



Rafaela Lopes Valadas Nunes
Licenciatura em Engenharia Biomédica

Limitadores de Corrente Supercondutores: Estudo da Ligação Magnética entre Enrolamentos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Dr. João Miguel Murta Pina. Prof. Auxiliar, FCT-UNL
Co-orientador: Mestre Pedro Miguel Lucas Arsénio, Uninova-CTS

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rui Manuel Leitão Santos Tavares
Arguente: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto
Vogal: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina.



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Outubro de 2014

Limitadores de Corrente Supercondutores: Estudo da Ligação Magnética entre Enrolamentos

Copyright © Rafaela Lopes Valadas Nunes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Espero não deixar ninguém aparte desta etapa, como tal agradeço a todos aqueles que contribuíram de certa forma para o desenvolvimento desta fase final, bem como, nos últimos tempos.

A todo o Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelas boas-vindas e sempre pela forma como me receberam, ajudaram e estiveram sempre presente durante todo o meu percurso.

Ao meu orientador, Professor João Murta Pina, por me ter dado a oportunidade de realizar a dissertação e por ter aberto portas ao estudo de uma área um pouco desconhecida para mim, e espero que tenha dado a minha contribuição ao estudo da supercondutividade. Um agradecimento pela sua disponibilidade e ajuda durante toda a fase de realização da dissertação, bem como a sua presença e o seu acompanhamento. Tanto durante a realização da dissertação, como também pelo Professor que foi.

Ao meu Co-orientador, Pedro Arsénio por toda a ajuda e disponibilidade desde o início e até ao fim desta etapa. Agradeço-lhe toda a receptividade prestada, pelos conhecimentos transmitidos na área da supercondutividade e pela sua vontade própria em estar presente ao longo de toda a dissertação.

Agradeço ao Nuno Amaro, por toda a disponibilidade que sempre demonstrou para comigo ao longo da dissertação.

Agradeço ao Nuno Vilhena pela sua disponibilidade e por ter proporcionado a realização do ensaio experimental com base no desenvolvimento e fabrico do material utilizado.

À minha Mãe, que embora estivesse ausente nos últimos quatro anos, esteve, está e estará sempre comigo. Agradeço pela Mãe que foste e sempre serás para nós!

À minha Avó, ao meu irmão Rafael e ao meu Pai por nos termos tornado num só.

Ao meu namorado, Ricardo Guerreiro, pela compreensão e presença ao longo dos últimos dois anos e especialmente nesta fase tao importante. Devo-lhe um obrigado gigante pela compreensão e paciência demonstrada.

Aos meus amigos de sempre e para sempre, Fábio Dias, Joana Canhoto e Ricardo Conceição, por todo o apoio e força ao longo de todas as etapas que percorremos sempre juntos! E acima de tudo por todo o carinho, disponibilidade e compreensão a qualquer hora do dia ou da noite.

Aos meus amigos de coração Inês Bernardo, a Inês Monteiro, Milton Fernandes, Luís Almeida e aos novos amigos, Carlota, Bruno, Gonçalo Filipa, Flávio e João, pela maravilhosa receção e por terem estado sempre presentes nos últimos dois anos.

Resumo

Nos dias de hoje, devido à rápida expansão dos meios urbanos e consequentemente das redes de energia elétrica, o correto funcionamento de todo o sistema tornou-se no ponto fulcral para a satisfação, confiabilidade, qualidade e redução de custos para todos os utilizadores. Como tal, a agregação de redes e consequente expansão provoca o aumento do risco de correntes de Curto-Circuito (CC) que poderão levar à destruição de equipamentos que constituem a rede, bem como a problemas para os consumidores.

Deste modo os limitadores de correntes constituídos por materiais com propriedades supercondutoras, nomeadamente, Supercondutores de Alta Temperatura (SAT), tornam-se numa solução para a resolução deste problema que afeta grande parte da população.

Os Limitadores de Corrente Supercondutor (LCS) constituem uma solução garantindo a proteção das redes de energia, bem como dos equipamentos e infraestruturas que os compõem, analogamente a outras soluções já existentes. Estes apresentam invisibilidade numa rede em regime de funcionamento normal e são desenvolvidos com o intuito de apresentar uma rápida recuperação e elevada impedância aquando da ocorrência de falha, minimizando os danos que poderiam causar.

Na presente dissertação são apresentados estudos e análises a três topologias de LCS do tipo indutivo de blindagem magnética com base em simulações recorrendo ao *software* de elementos finitos Flux2D® e com base nos ensaios experimentais. O estudo baseia-se na análise do modo de funcionamento dos LCS em regime de funcionamento normal, variando algumas características dos limitadores, bem como a análise crítica a algumas variáveis no âmbito do tema da presente dissertação, de modo a minimizar as perdas.

Palavras-chave: Limitadores de corrente supercondutor do tipo indutivo, Supercondutores de Alta Temperatura, *software* Flux2D®.

Abstract

Nowadays, the fast urban expansion and consequently electric power grids, the correct operation of the system has become the focal point for the satisfaction, reliability, quality and low cost for all consumers. So, the aggregation and expansion of electric power grids causes an increased risk of short circuit which may lead to destruction of grids equipment and problems to consumers.

So, the Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) consists of materials with superconducting properties, for example, High Temperature Superconductors (HTS) and they become the most viable and economical solution to solve this problem which affects the population.

The SFCL became the alternative to guarantee the protection of electric power grids, equipment, infrastructures comparing to other solutions. They are invisible to the electric power grid and they are developed to present a fast recovery during a fault, which minimizes the damage.

This dissertation shows the study and analyses of three inductive type of SFCL based on simulation with finite elements software Flux2D® and in experimental results. The study and analysis based on normal operation, which some characteristics were modified and it analyzed some variables within the subject of the dissertation to minimize losses.

Keywords: Inductive type Superconducting Fault Current Limiter, High Temperature Superconductors, software Flux2D®.

Índice de Matérias

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organização da Dissertação	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Conceitos Gerais da Supercondutividade	5
2.1.1	Propriedades dos Materiais Supercondutores	5
2.1.1.1	Resistência Nula.....	5
2.1.1.2	Efeito Meissner: Diamagnetismo Perfeito	6
2.1.2	Parâmetros Críticos.....	7
2.1.3	Tipos de Supercondutores	8
2.1.3.1	Supercondutores do Tipo I	8
2.1.3.2	Supercondutores do Tipo II	10
2.2	Tipos de Supercondutores de Alta Temperatura	11
2.2.1	Fitas Supercondutoras	11
2.2.2	Supercondutores Maciços	13
2.3	Aplicações dos Supercondutores na Rede Elétrica	13
2.3.1	Limitadores de Corrente	14
2.3.2	Cabos de Energia	14
2.4	Limitador de Corrente Supercondutor Indutivo	16
2.4.1	Estado da Arte	18
3	Descrição da Metodologia	23
3.1	Introdução.....	23
3.3	Topologias dos Limitadores de Corrente Supercondutores	28
3.4	Síntese	28
4	Simulação e Análise de Resultados no <i>Software Flux2D®</i>	29
4.1	Topologia 1	30
4.1.1	Corrente no Enrolamento Secundário	31
4.1.2	Queda de Tensão aos Terminais do LCS	33
4.1.3	Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário	38
4.1.4	Densidade de Fluxo Magnético	42
4.2	Topologia 2.....	47
4.2.1	Corrente no Enrolamento Secundário	48
4.2.2	Queda de Tensão aos Terminais do LCS	49
4.2.3	Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário	53
4.2.4	Densidade de Fluxo Magnético	58
4.3	Topologia 3.....	62
4.3.1	Corrente no Enrolamento Secundário	63

4.3.2	Queda de Tensão aos Terminais do LCS	64
4.3.3	Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário	66
4.3.4	Densidade de Fluxo Magnético	67
4.4	Síntese	69
5.1	Constituição do Protótipo do LCS	71
5.2	Montagem Experimental	72
5.3	Ensaio Experimental do Limitador com T3	75
5.4	Análise de Resultados.....	77
5.4.1	Queda de Tensão aos Terminais do LCS	78
5.4.2	Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário	79
5.5	Síntese	81
6	Conclusões	83
6.1	Considerações Finais	83
6.2	Trabalho Futuro	85
Apêndices		91
Apêndice 1 – Dimensões do Núcleo Ferromagnético com Topologia 1 e 2.		91
Apêndice 2 – Dimensões do Núcleo Ferromagnético com Topologia 3 (Ferreira, 2013)		92

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Resultados obtidos por Onnes onde relaciona a resistência do material com a temperatura, marcando assim o início do estudo das propriedades supercondutoras dos materiais (Fujita, Ito, & Godoy, 2009).....	6
Figura 2.2 - Variação da Magnetização (M) em função do campo magnético (H) aplicado num material supercondutor (Adaptado de: (Sheahen, 1994)).....	7
Figura 2.3 - Superfície crítica de um supercondutor. O valor T_c define-se como a temperatura crítica, J_c representa a densidade de corrente crítica e o H_c indica o campo magnético crítico (Adaptado de: (Kalsi, 2011)).....	8
Figura 2.4 - Diagrama de magnetização referente aos supercondutores do tipo I (Pina, 2010)..	9
Figura 2.5 - Diagrama de magnetização referente aos supercondutores do tipo II (Pina, 2010).	10
Figura 2.6 - Arquitetura e Fitas SAT. (a) Estrutura de uma fita 2G de YBCO (Y-123). (b) Fita Supercondutora 1G Bi-2223 desenvolvida pela empresa SuperPower® (Hazelton, 2010) (Larbalestier, Gurevich, Matthew Feldmann , & Pol, 2001).	12
Figura 2.7 – Discos e tubos supercondutores maciços desenvolvidos pelas empresas Can Superconductors e Nexans. (a) Disco maciço de levitação magnética composto por YBCO. (b) Tubo de blindagem magnética composto por BSCCO 2212. (Fonte: http://www.can-superconductors.com/levitation-bulk.html) (Último acesso dia 31 de Julho de 2014); Fonte: http://www.nexans.de/eservice/Germany-en/navigate_299973/Components.html (Último acesso dia 31 de Julho de 2014)).	13
Figura 2.8 - Cabos de energia compostos por SAT. (a) Cabo de uma fase da Nexans. (b) Cabo de três fases da SuperPower® (Fonte: http://www.superpower-inc.com/content/hts-transmission-cable# (Último acesso dia 7 de Agosto de 2014)) (Fonte: http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigate_-10 (Último acesso dia 7 de Agosto de 2014)).	15
Figura 2.9 – Representação do esquema elétricos do LCS do tipo indutivo.	17
Figura 2.10 – Densidade de fluxo magnético. (a) Regime de funcionamento normal (b) Regime de funcionamento em falha.	18
Figura 2.11 – Limitador de Corrente Supercondutor de Blindagem Magnética com 12 kV desenvolvido pela empresa ABB (Paul, et al., 1998).....	20
Figura 2.12 - Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados com 12 kV desenvolvido pela empresa Zenergy Power Inc. (a) Design do Limitador de Corrente. (b) Aspeto real do Limitador de Corrente Supercondutor (Fonte: http://www.htspeerreview.com/2009/pdfs/presentations/day%203/applications/2-Zenergy-Fault-Current-Limiter.pdf) (Último acesso dia 7 de agosto de 2014)).....	21
Figura 3.1 - Degradação da densidade de corrente crítica na presença de campos magnéticos. Gráficos elaborados com base num catálogo da empresa <i>American Superconductor</i> para uma fita com o modelo <i>HTS High Strength Plus Wire</i> (http://www.amsc.com/) (Pina, 2010)	

(a) Densidade de fluxo paralela à superfície da fita SAT. (b) Densidade de fluxo perpendicular à superfície da fita SAT.	26
Figura 3.2 – Princípio de funcionamento de um LCS do tipo indutivo. (a) Regime de funcionamento normal: o enrolamento secundário blinda o fluxo magnético. (b) Regime de funcionamento em falha: o fluxo magnético penetra no núcleo ferromagnético e o supercondutor passa para o estado normal (Adaptado de: (Kosak, Janowski, Kozak, Wojtasiewicz, & Glowacki, 2006)).	27
Figura 4.1 - Dimensões definidas para os três casos referentes ao enrolamento primário para a T1 e T2 com 20 espiras no enrolamento primário. (a) Caso real. (b) Caso 1. (c) Caso 2. (d) Caso 3.	30
Figura 4.2 – LCS do tipo indutivo com Topologia 1.	30
Figura 4.3 - Corrente no enrolamento secundário com T1.	32
Figura 4.4 - Corrente no enrolamento secundário com T1 para os casos 1, 2 e 3.	33
Figura 4.5 – Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	34
Figura 4.6 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	35
Figura 4.7 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	37
Figura 4.8 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	38
Figura 4.9 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	39
Figura 4.10 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	40
Figura 4.11 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	41
Figura 4.12 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	42
Figura 4.13 – Densidade de fluxo magnético com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	43

Figura 4.14 - Densidade de fluxo magnético com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.....	44
Figura 4.15 - Densidade de fluxo magnético com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	45
Figura 4.16 - Densidade de fluxo magnético com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	46
Figura 4.17 - LCS do tipo indutivo com Topologia 2.	47
Figura 4.18 - Corrente no enrolamento secundário com T2.	48
Figura 4.19 – Corrente no enrolamento secundário com T2 para os casos 1, 2 e 3.....	49
Figura 4.20 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	50
Figura 4.21 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	51
Figura 4.22 – Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	52
Figura 4.23 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	53
Figura 4.24 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	54
Figura 4.25 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	55
Figura 4.26 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	56
Figura 4.27 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	57
Figura 4.28 – Densidade de fluxo magnético com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.....	58

Figura 4.29 - Densidade de fluxo magnético com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.....	59
Figura 4.30 – Densidade de fluxo magnético com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	60
Figura 4.31 - Densidade de fluxo magnético com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.	61
Figura 4.32 – LCS do tipo indutivo com Topologia 3.	62
Figura 4.33 – Corrente no enrolamenro secundário com T3 em que o SAT possui uma fita e duas fitas.	64
Figura 4.34 – Queda de tensão aos terminais do LCS com T3 em que o SAT possui 1 fita e 2 fitas. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores..	65
Figura 4.35 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T3 em que o SAT possui 1 fita e 2 fitas. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores..	67
Figura 4.36 - Densidade de fluxo magnético com T3 quando os enrolamentos se encontram afastados 19 mm. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores.....	68
Figura 4.37 - Densidade de fluxo magnético com T3 quando os enrolamentos se encontram afastados 39 mm. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores.....	69
Figura 5.1 - Estrutura do LCS e Fitas Supercondutoras utilizadas no ensaio experimental. (a) Protótipo do LCS do tipo indutivo. (b) Duas fitas supercondutoras Bi-2223 fabricadas pela empresa Innost.....	72
Figura 5.2 – Circuito subtrator com o circuito integrador no CH1.....	73
Figura 5.3 – Circuito elétrico referente à aquisição dos dados provenientes do protótipo do LCS utilizado no ensaio experimental.	74
Figura 5.4 – Montagem e parâmetros medidas durante o ensaio experimental.	74
Figura 5.5 – Montagem experimental utilizada para o protótipo.....	75
Figura 5.6 - Montagem do ensaio experimental realizado ao protótipo existente no laboratório.	76
Figura 5.7 – Queda de tensão aos terminais do LCS com base nos resultados experimentais. (a) Enrolamento primário com 20 espiras. (b) Enrolamento primário com 80 espiras.	79
Figura 5.8 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com base nos resultados experimentais em que o enrolamento primário possui 20 e 80 espiras.	80

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Elementos supercondutores do tipo I e respetivos valores de temperatura crítica (Cyrot & Pavuna, 1995) (Chen , Kauffman, & Lomonaco, 2008).	9
Tabela 2.3 – Compostos com propriedades supercondutoras do tipo II e respetivos valores de temperatura critica (Chen , Kauffman, & Lomonaco, 2008).	11
Tabela 5.1 – Dados técnicos da fita supercondutora Bi-2223 utilizada para o procedimento experimental referente à empresa Innost (Arsénio, 2012).	72

Simbologia

Símbolo	Designação	Unidade
A	Secção do núcleo ferromagnético do limitador	mm²
B	Densidade de fluxo magnético ou intensidade do campo de indução magnética	T
H_c	Campo magnético crítico	A. m⁻¹
H_{c1}	Campo magnético crítico (Limite Inferior)	A. m⁻¹
H_{c2}	Campo magnético crítico (Limite Superior)	A. m⁻¹
I_{Linha}	Intensidade da corrente na linha ou no enrolamento primário	A
I_{SAT}	Intensidade da corrente no enrolamento secundário	A
I₁	Intensidade da corrente no enrolamento primário	A
I₂	Intensidade da corrente no enrolamento secundário	A
J_c	Densidade de corrente crítica	A. m⁻²
L	Comprimentos da secção dos enrolamentos	m
N₁	Número de espiras do enrolamento primário	e
N₂	Número de espiras do enrolamento secundário	e
T_c	Temperatura crítica	K
U_{LCS}	Tensão elétrica do limitador	V
R_{Linha}	Resistência de Linha	Ω
R_{Carga}	Resistência de Carga	Ω
μ₀	Permeabilidade magnética do vazio ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)	H/m
T	Temperatura	K
ψ	Fluxo ligado com o enrolamento primário	Wb
ε	Força eletromotriz induzida	V
Δψ	Variação do fluxo magnético	Wb
Δt	Variação do tempo	s

Notações

Acrónimo	Designação
1G	1ª Geração
2G	2ª Geração
Bi-2223	Fita supercondutora com a composição química: $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{12}$
BISCCO	Liga de bismuto, estrôncio, cálcio, cobre e oxigénio com a composição química: $Bi_2Sr_2Ca_nCu_{n+1}O_{6+2n}$
CC	Curto-Circuito
LCS	Limitador de Corrente Supercondutor
SAT	Supercondutor de Alta Temperatura
SBT	Supercondutores de Baixas Temperaturas
T1	Topologia 1
T2	Topologia 2
T3	Topologia 3
TS	Transformador Supercondutor
YBCO	Liga de ítrio, bário, cobre e oxigénio com a composição química: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$
fmm	Força Magnetomotriz (A.e)

1 Introdução

A presente dissertação intitulada *Limitadores de Corrente Supercondutores: Estudo da Ligação Magnética entre Enrolamentos* baseia-se no estudo das ligações magnéticas entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário de um LCS do tipo indutivo. Recorreu-se ao *software* de elementos finitos da Cedrat, Flux2D® e posteriormente a resultados provenientes de ensaios experimentais.

As simulações têm como finalidade a análise da influência de parâmetros no desempenho do dispositivo. Numa fase posterior, foram realizados ensaios experimentais num protótipo de um LCS indutivo, presente e desenvolvido no laboratório do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, com o propósito de verificar o seu comportamento e posteriormente compará-los com os resultados obtidos por simulação.

1.1 Motivação

De modo a proporcionar qualidade no fornecimento de energia, segurança, garantias no controlo e minimização dos efeitos das correntes de CC, uma das soluções centra-se no desenvolvimento de limitadores de corrente. Estes protegem o sistema de energia dos picos de corrente com o intuito de diminuir o impacto e consequentes problemas nas redes elétricas, entre outros.

A ocorrência de um CC no sistema torna-se uma condição anómala na rede que envolve problemas em vários aspetos, nomeadamente no transporte e na distribuição de energia para os consumidores, e na potencial destruição do equipamento que constitui a linha. As correntes de CC podem acontecer devido à degradação dos componentes que constituem o equipamento do sistema de energia graças a efeitos térmicos ou mecânicos e ainda devido a fatores externos, particularmente as condições atmosféricas (Tleis, 2008) (Blair S. M., 2013).

A nível económico, a substituição e a reparação dos equipamentos deteriorados requer manutenção e torna-se pouco viável devido aos longos tempos de interrupção do sistema de energia, proporcionando insatisfação nos consumidores (Blair, et al., 2011).

Neste contexto, existem diversos dispositivos de proteção da rede, como é o caso dos transformadores de alta impedância, das indutâncias, dos fusíveis, das bobinas de núcleo de ar, entre outros. Porém, não se consideram as melhores soluções, visto que os transformadores e as indutâncias proporcionam perdas de energia, enquanto que os fusíveis necessitam a sua substituição em caso de falha (Pina, 2010).

A utilização de materiais supercondutores na constituição de limitadores de corrente faz com que este atue rapidamente em casos de CC evitando danificar os equipamentos que constituem o sistema, proporcionam aumento da vida útil dos dispositivos, preserva a qualidade na energia e a estabilidade da rede.

Os LCS podem ser do tipo indutivo, resistivo ou híbrido. No contexto da presente dissertação, apenas se dará ênfase aos limitadores do tipo indutivo que por sua vez podem-se dividir em limitadores de corrente de núcleos saturados e em limitadores de corrente de blindagem magnética, entre outros. Os LCS do tipo indutivo de blindagem magnética são compostos por um núcleo ferromagnético, um enrolamento primário composto por cobre e por um enrolamento secundário constituído por material supercondutor.

De um modo geral, o material supercondutor apresenta resistência nula, e tem como principal objetivo blindar o fluxo magnético de modo a que este não penetre no núcleo ferromagnético do LCS, em regime de funcionamento normal. Quando ocorre uma falha na rede levando ao aparecimento de correntes de CC, verifica-se um aumento abrupto na corrente fazendo com que o material perca as suas propriedades supercondutoras e transite para o estado normal onde apresenta resistência diferente de zero e inicia a limitação de corrente de CC. Neste sentido, permite que o fluxo magnético circule livremente pelo núcleo ferromagnético do LCS (Kosak, Janowski, Kozak, Wojtasiewicz, & Glowacki, 2006).

Devido à expansão e ao desenvolvimento da tecnologia relacionada com as propriedades supercondutoras dos materiais, a investigação na área da criogenia tornou-se um alvo de atenção por parte dos investigadores. Como tal, esta é utilizada para o arrefecimento dos materiais supercondutores onde a sua utilização apresenta um elevado custo de infraestrutura e manutenção, representa uma técnica eficiente, segura devido ao seu carácter não inflamável e não apresenta ameaças perante o meio ambiente (Wang, 2013). Porém, este tema não se encontra explorado na presente dissertação, em virtude de não contemplar os objetivos da mesma.

A construção e o desenvolvimento de LCS do tipo indutivo depende da escolha dos tipos de materiais supercondutores. Estes podem ser utilizados na forma de fitas supercondutoras de 1ª Geração (1G) compostas por BSCCO 2212 e 2223, ainda no formato de cilindros supercondutores maciços compostos por YBCO de 2ª Geração (2G). Caso se opte pela utilização de fitas supercondutoras de 2G, segundo a empresa *Nexans*, as vantagens relacionam-se com o transporte de elevados valores de densidade de corrente, permite a construção de LCS de pequenas dimensões e proporcionam a sua produção em grande escala (Arsénio, 2012). Em contrapartida, quando se utilizam cilindros supercondutores maciços no fabrico de LCS, estes apresentam excelentes propriedades magnéticas quando mergulhados em hidrogénio líquido, porém, não é possível fabricá-los em elevadas dimensões.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos da presente dissertação centram-se na realização do estudo das ligações magnéticas entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário de um LCS monofásico do tipo indutivo. A dissertação terá por base o estudo, a análise e a simulação, utilizando o *software* Flux2D®, de algumas parâmetros, tais como, a corrente do enrolamento secundário, a tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético.

Serão simuladas três topologias diferentes de LCS do tipo indutivo evidenciando as principais diferenças entre si, nomeadamente nas dimensões e na disposição dos constituintes do dispositivo. As três topologias possuem um núcleo ferromagnético fechado composto por ferro, um enrolamento primário composto por uma bobina de cobre onde o número de espiras é variável e um enrolamento secundário formado por fita supercondutora de 1G. Na Topologia 1 (T1) os enrolamentos encontram-se afastados entre si, enquanto que na Topologia 2 (T2), o enrolamento secundário encontra-se envolto pelo enrolamento primário. A última topologia a estudar, a Topologia 3 (T3) é semelhante à T2 relativamente à disposição dos enrolamentos.

Posteriormente será realizado um ensaio experimental com a utilização de um protótipo existente em laboratório, onde se irão estudar algumas parâmetros, como é o caso do fluxo ligado e a queda de tensão aos terminais do LCS. Assim sendo, a dissertação compreende os seguintes tópicos:

1. Definição e simulação, em regime de funcionamento normal, de três topologias de LCS do tipo indutivo no *software* de elementos finitos, Flux2D®;
2. Análise crítica dos resultados obtidos por simulação tendo em conta a corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético;
3. Dimensionamento e realização de ensaios experimentais, tendo como base o desempenho de um protótipo de um LCS existente no laboratório, em regime de funcionamento normal;
4. Análise crítica dos resultados obtidos no ensaio experimental.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O *Capítulo 1 – Introdução* engloba a motivação para o desenvolvimento da dissertação abrangendo ainda os objetivos a alcançar.

O *Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica* refere-se aos conceitos gerais acerca da supercondutividade, abrangendo as propriedades que definem os materiais supercondutores, os parâmetros críticos, bem como os tipos de supercondutores que existem consoante a sua zona de funcionamento. Dará uma breve referência aos tipos de SAT e em que formato comercial se encontram disponíveis, bem como, algumas aplicações na rede elétrica. E por fim, o presente capítulo dará ênfase aos LCS do tipo indutivo, englobando o estado de arte da presente dissertação.

O *Capítulo 3 – Descrição da Metodologia* irá incidir nas topologias a estudar e a simular no *software* de elementos finitos Flux2D®. As simulações a realizar terão como base o estudo das ligações magnéticas entre os enrolamentos, partindo da análise da corrente no material supercondutor, na queda de tensão aos terminais do LCS, no fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético, sendo estas cruciais para o desenvolvimento da presente dissertação.

O *Capítulo 4 – Simulação e Análise de Resultados no Software Flux2D®* irá focar-se nas simulações, em regime de funcionamento normal, com base nas variáveis a analisar. O estudo irá basear-se na corrente que atravessa o enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético.

O *Capítulo 5 – Procedimento Experimental* dará ênfase a todo o ensaio experimental realizado para o protótipo do LCS do tipo indutivo, abrangendo a descrição da montagem a utilizar e o respetivo dimensionamento. O ensaio experimental será realizado em regime de funcionamento normal onde serão analisados o fluxo ligado com o enrolamento primário, a queda de tensão aos terminais do LCS, bem como a corrente na linha e a tensão na fonte de modo a verificar o correto funcionamento do protótipo.

O *Capítulo 6 – Conclusões e Trabalho Futuro* compreenderá todas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento da dissertação, bem como algumas ideias futuras de modo a conferir continuidade ao trabalho desenvolvido até ao momento.

2 Revisão Bibliográfica

O presente capítulo refere-se à revisão bibliográfica acerca dos conceitos gerais da supercondutividade com base nas suas propriedades, nos parâmetros críticos, nos tipos existentes e os formatos dos materiais supercondutores existentes no mercado.

Numa fase posterior são apresentados os dispositivos compostos por materiais supercondutores com aplicações na rede elétrica, bem como a noção e o princípio de funcionamento de um limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo no qual se baseia a dissertação. São também apresentados alguns exemplos de limitadores de corrente que têm vindo a ser desenvolvidos a nível industrial.

2.1 Conceitos Gerais da Supercondutividade

A supercondutividade foi descoberta em 1911 pelo físico Heike Kamerlingh Onnes no seu laboratório da Universidade de Leiden na Holanda quando este estudava as propriedades de alguns metais (Ireson, 2012). Os materiais com propriedades supercondutoras caracterizam-se pela condução de corrente com resistência nula em regime DC e por apresentarem diamagnetismo perfeito (conhecido por efeito Meissner).

2.1.1 Propriedades dos Materiais Supercondutores

No estado supercondutor, os materiais são caracterizados por exibirem propriedades elétricas e magnéticas muito particulares, destacando-se a resistência nula e o diamagnetismo perfeito, respetivamente.

2.1.1.1 Resistência Nula

Nos materiais supercondutores a resistência é zero para todas as temperaturas abaixo da temperatura crítica, T_c , sendo esta uma característica de cada material. Contudo, se o valor da corrente for superior ao valor da densidade de corrente crítica, o material deixa de estar no estado supercondutor e passa a estar no estado normal (Cyrot & Pavuna, 1995).

A figura 2.1 evidencia os resultados obtidos no estudo realizado por Onnes, no qual foi utilizado o mercúrio (Hg). Este foi arrefecido em hélio líquido e Onnes verificou que abaixo de 4,2 K, o mercúrio apresentava resistência nula. Quando este se encontrava a 4,2 K, o mercúrio encontrava-se num novo estado, o estado supercondutor (Onnes, 1912). Por outro lado, para valores de temperatura superiores a 4,2 K, o mercúrio apresentava resistência diferente de

zero e neste sentido, o material encontra-se no estado normal, sem apresentar propriedades supercondutoras (Buckel & Kleiner, 2004).

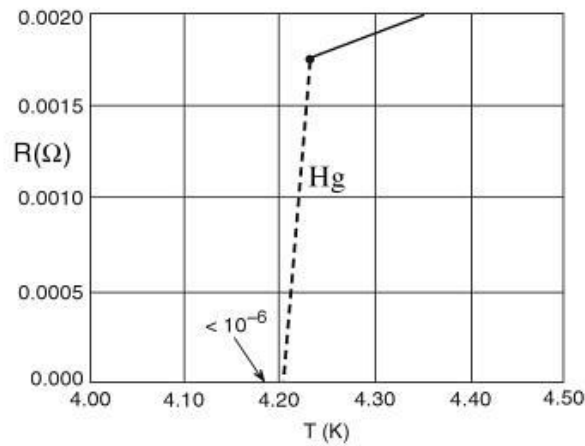


Figura 2.1 - Resultados obtidos por Onnes onde relaciona a resistência do material com a temperatura, marcando assim o início do estudo das propriedades supercondutoras dos materiais (Fujita, Ito, & Godoy, 2009).

2.1.1.2 Efeito Meissner: Diamagnetismo Perfeito

O diamagnetismo perfeito, conhecido como efeito Meissner foi descoberto por Walter Meissner e Robert Oschenfeld em meados de 1933 e representa uma característica dos materiais supercondutores onde não existe a penetração do fluxo magnético no interior do material. Verifica-se o aparecimento de uma corrente de blindagem à superfície do material e neste sentido o fluxo magnético é expelido do seu interior, caso o campo magnético seja suficientemente fraco (Wang, 2013) (Hein, Francavilla, & Liebenberg, 1991). Sendo assim, no interior do material supercondutor tem-se, $B = 0$, evidenciando as expressões (2.1) e (2.2), tem-se que:

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) \quad (2.1)$$

Quando $B = 0$ tem-se a expressão (2.2):

$$M = -H \quad (2.2)$$

Em que B corresponde à densidade de fluxo magnético, o μ_0 apresenta a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$), o H representa o campo magnético aplicado e o que o M corresponde à Magnetização (Fossheim & Sudboe, 2005).

Neste sentido, o diamagnetismo perfeito caracteriza-se pela inexistência de densidade de fluxo magnético no interior de um material supercondutor. Com base na figura 2.2, é possível observar que consoante o aumento do valor da magnetização e do campo magnético aplicado, o material permanece no estado supercondutor. Para valores superiores a H_c , o material encontra-se no estado normal e torna-se num condutor regular, deixando de possuir propriedades supercondutoras.

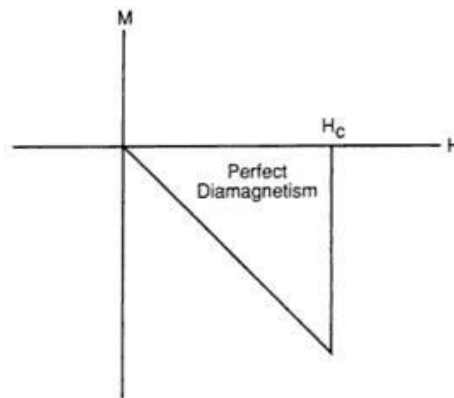


Figura 2.2 - Variação da Magnetização (M) em função do campo magnético (H) aplicado num material supercondutor (Adaptado de: (Sheahen, 1994)).

2.1.2 Parâmetros Críticos

O comportamento de um material supercondutor pode ser descrito com base numa superfície crítica a três dimensões onde se inserem os seguintes parâmetros: Campo Magnético Crítico (H_c), Densidade de Corrente Crítica (J_c) e Temperatura Crítica (T_c) (Barth, 2013).

A figura 2.3 ilustra a representação dos parâmetros críticos em que cada valor dentro da área delineada a cinzento significa que o material encontra-se no estado supercondutor. Em contrapartida, cada valor exterior a essa área indica que o material encontra-se no estado normal, sem propriedades supercondutoras (Barth, 2013) (Poole, Farach , Creswick, & Prozorov, 2007).

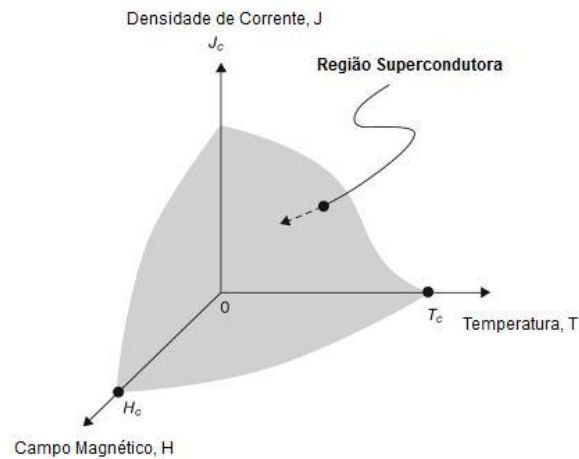


Figura 2.3 - Superfície crítica de um supercondutor. O valor T_c define-se como a temperatura crítica, J_c representa a densidade de corrente crítica e o H_c indica o campo magnético crítico (Adaptado de: (Kalsi, 2011)).

Com base nas variáveis presentes no gráfico da figura 2.3, a densidade de corrente crítica designa-se pela corrente máxima que pode ser atravessada no material sem destruir o seu estado supercondutor (Poole, Farach, Creswick, & Prozorov, 2007) (Wang, 2013).

O campo magnético crítico representa o campo aplicado abaixo do qual o material encontra-se no estado supercondutor e acima do qual este encontra-se no estado normal, sendo responsável pela destruição da supercondutividade do material (Parinov, 2012) (Smith & Hashemi, 2010).

A temperatura crítica define-se como a temperatura à qual o material apresenta resistência nula e marca a transição do estado normal para o estado supercondutor. Posto isto, é possível garantir que quando $T < T_c$ o material encontra-se no estado supercondutor e quando $T > T_c$, o material encontra-se no estado normal (Bhattacharya & Paranthaman, 2010).

2.1.3 Tipos de Supercondutores

Os materiais supercondutores encontram-se divididos em dois tipos de acordo com as suas propriedades magnéticas, sendo estes os supercondutores do tipo I, conhecidos como “supercondutores macios” e os supercondutores do tipo II, denominados “supercondutores duros”. A principal diferença existente entre os dois tipos de supercondutores centra-se nas propriedades magnéticas (Sheahen, 1994) (Matsushita, 2007).

2.1.3.1 Supercondutores do Tipo I

Os supercondutores do tipo I incluem alguns elementos, com exceção dos elementos ouro (Au), a prata (Pt) e o cobre (Cu) e caracterizam-se por apresentar um valor de T_c bastante

baixo (Cyrot e Pavuna, 1992) (Parinov, 2012). Neste caso, o supercondutor repele na totalidade o fluxo magnético do seu interior, verificando-se o Efeito Meissner (Buckel & Kleiner, 2004).

Com base na figura 2.4, é possível observar o diagrama de magnetização de um material supercondutor do tipo I em que existe um valor de campo magnético crítico e que abaixo desse valor, o material apresenta propriedades supercondutoras, em que o fluxo magnético é totalmente expulso do interior do material. Assim que o valor do campo magnético aumenta e alcança o valor de H_c , a supercondutividade do material é destruída e este retorna ao estado normal. Nesta altura, ocorre a penetração das linhas de fluxo magnético no interior do material (Parinov, 2012) (Smith & Hashemi, 2010).

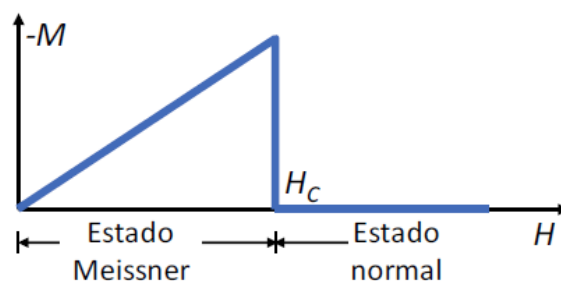


Figura 2.4 - Diagrama de magnetização referente aos supercondutores do tipo I (Pina, 2010).

Os cerâmicos baseados em elementos, maioritariamente compostas por metais são exemplos de compostos que se comportam como supercondutores do tipo I. Deste modo, a tabela 2.1, evidencia diversos elementos com propriedades supercondutoras do tipo I com os respetivos valores de temperatura crítica.

Tabela 2.1 – Elementos supercondutores do tipo I e respetivos valores de temperatura crítica (Cyrot & Pavuna, 1995) (Chen, Kauffman, & Lomonaco, 2008).

Elemento (Símbolo Químico)	T_c [K]
Chumbo (Pb)	7,2
Mercúrio (Hg)	4,2
Estanho (Sn)	3,72
Tálio (Tl)	2,38
Alumínio (Al)	1,18
Zinco (Zn)	0,85

2.1.3.2 Supercondutores do Tipo II

Os supercondutores do tipo II abrangem as ligas metálicas, alguns compostos químicos com a exceção dos metais puros, tal como o vanádio (V), tecnécio (Tc) e o nióbio (Schmidt, 1997) (Parinov, 2012). A figura 2.5 apresenta o gráfico referente ao campo magnético crítico em função da temperatura onde é possível observar três estados diferentes que o material supercondutor do tipo II poderá sofrer consoante o campo magnético aplicado: o efeito Meissner, o estado misto e o estado normal.

Com base na figura 2.5, é possível observar o diagrama de magnetização referente aos materiais supercondutores do tipo II em este apresenta dois valores de campo magnético crítico, o limite inferior, designado por H_{c1} e o limite superior, H_{c2} . Para campos magnéticos com valores abaixo do limite inferior, o supercondutor do tipo II comporta-se como um supercondutor do tipo I sofrendo o efeito Meissner.

Quando o campo magnético apresenta valores no intervalo $H_{c1} < H < H_{c2}$, o material supercondutor encontra-se num novo estado, o estado misto ou conhecido como estado Shubnikov, que segundo Abrikosov, “o supercondutor pode existir num estado peculiar que não é completamente diamagnético (Efeito Meissner parcial)” (Abrikosov, 1957) (Buckel & Kleiner, 2004). Neste estado, o fluxo magnético não é totalmente expulso do interior do material, ocorrendo a sua penetração, de forma parcial, existindo regiões no estado normal e outras regiões no estado supercondutor (Fossheim & Sudboe, 2005).

De um modo intrínseco, o estado misto consiste numa matriz supercondutora através do qual, as linhas de fluxo magnético com espessura finita, conhecidos por fluxóides ou vórtices de Abrikosov, penetram no material em que cada um transporta consigo um *quantum* de fluxo magnético (Buckel & Kleiner, 2004).

O material continua a conduzir com resistência nula até que o valor do campo magnético atinja um valor superior a H_{c2} e nesse caso, o material retorna ao estado normal (Cyrot & Pavuna, 1995).

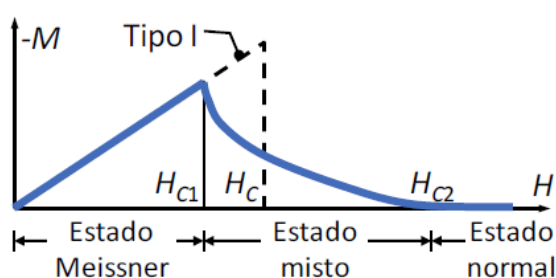


Figura 2.5 - Diagrama de magnetização referente aos supercondutores do tipo II (Pina, 2010).

Em 1930, graças às investigações de W. de Haas e J. Voogd, a liga de chumbo e de bismuto foram os primeiros materiais supercondutores do tipo II a serem descobertos. Os primeiros compostos classificados como supercondutores do tipo II foi o nióbio-titânio (NbTi) e o nióbio-estanho (Nb₃Sn). As ligas metálicas e outros compostos (com exceção do vanádio e do nióbio) são exemplos de materiais supercondutores do tipo II (Seeber, 1998). A tabela 2.2 evidencia alguns compostos com propriedades supercondutoras do tipo II e respetivos valores de T_c .

Tabela 2.2 – Compostos com propriedades supercondutoras do tipo II e respetivos valores de temperatura crítica (Chen , Kauffman, & Lomonaco, 2008).

Material (Símbolo Químico)	T_c [K]
NbTi	10
MgB₂	39
LaSrCuO	40
YBa₂Cu₃O₇	90
Bi₂Sr₂CaCu₂O₈	90
TiBaCaCuO	125
HaBa₂Ca₂Cu₃O₈	133

2.2 Tipos de Supercondutores de Alta Temperatura

Comercialmente, os materiais supercondutores podem encontrar-se na forma de fitas supercondutoras de 1G e de 2G e ainda no formato de blocos maciços. A presente secção mostra a composição, a aplicação e o formato destes materiais no mercado.

2.2.1 Fitas Supercondutoras

As fitas supercondutoras encontram-se divididas em fitas 1G, como é o caso do BSCCO (*Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide* – Liga de bismuto, estrôncio, cálcio, cobre e oxigénio) e em fitas 2G como é o exemplo do YBCO (*Yttrium, Barium, Copper, Oxide* - Liga de ítrio, bário, cobre e oxigénio).

As fitas supercondutoras de 1G são constituídas por prata (Ag) com o intuito de proporcionar suporte mecânico, entre outras funcionalidades e podem ainda ser constituídas à base de BSCCO, como é o exemplo das fitas Bi-2223 e Bi-2212 (Plakida, 2010). Estas apresentam estruturas com multifilamentos onde são inseridas numa matriz constituída por prata e posteriormente são tratadas termicamente. Como a prata constitui cerca de 70% do volume da fita e devido ao seu elevado custo, a sua aplicação torna-se pouco viável (Melhem, 2012).

As fitas 1G possuem a capacidade de transportar correntes críticas de, aproximadamente, 180 A/cm a 77 K o que as torna bastante viáveis em algumas aplicações, nomeadamente, em cabos de transporte de energia, no fabrico de bobinas, em geradores, em motores, entre outros (Plakida, 2010) (Pina, 2010).

Porém, as fitas de 1G apresentam algumas desvantagens, na medida em que, implica a utilização de elevadas quantidades de prata para o seu fabrico (Melhem, 2012). Neste sentido, com o intuito de reduzir os custos na produção de fitas 1G, vários investigadores dedicaram a sua pesquisa ao desenvolvimento de fitas supercondutoras 2G com base em compostos de YBCO levando a um rápido desenvolvimento de novas aplicações para os cabos supercondutores, entre outros (Bhattacharya & Paranthaman, 2010).

As fitas supercondutoras 2G são apresentadas uma estrutura flexível e são fabricadas através da deposição de vários componentes, tal como se pode observar pela na figura 2.6(a), garantindo uma maior estabilidade elétrica, térmica, mecânica e química (Plakida, 2010) (Melhem, 2012). A figura 2.6(b) ilustra uma fita SAT de 1G, a Bi-2223. Tanto a estrutura da fita 2G da figura 2.6(a) e da figura 2.6(b) são desenvolvidas e comercializadas pela empresa *SuperPower*®.

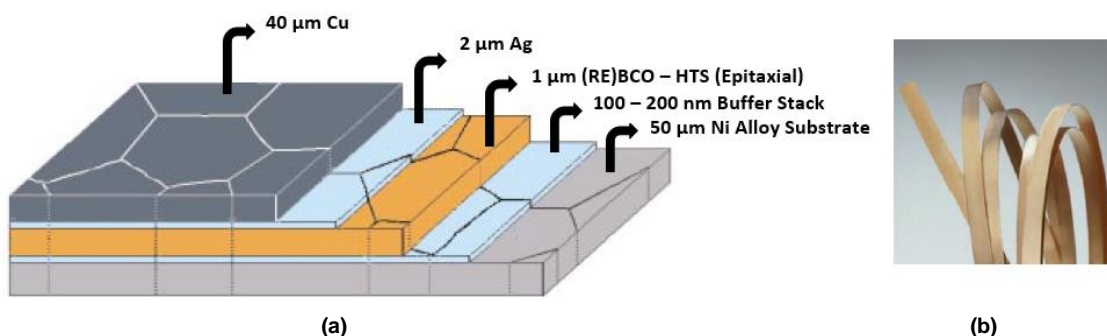


Figura 2.6 - Arquitetura e Fitas SAT. (a) Estrutura de uma fita 2G de YBCO (Y-123). (b) Fita Supercondutora 1G Bi-2223 desenvolvida pela empresa *SuperPower*® (Hazelton, 2010) (Larbalestier, Gurevich, Matthew Feldmann , & Pol, 2001).

As fitas 2G compostas por YBCO possuem uma densidade de corrente crítica na ordem dos 250 A/cm, bastante superior comparativamente às fitas de 1G (Plakida, 2010). Outras vantagens das fitas 2G em relação às fitas 1G relaciona-se com o facto destas suportarem um regime de operação a elevadas temperaturas, resistência térmica, propriedades mecânicas bastante superiores, entre outras (Arsénio, 2012) (Sytnikov, Vysotsky, Radchenko, & Polyakova, 2008).

2.2.2 Supercondutores Maciços

Os supercondutores maciços podem ser apresentados na forma de YBCO, em Bi-2212 e Bi-2223, e podem ser mono ou policristalinos. Os YBCO monocristalinos possuem densidade de corrente crítica mais elevada em comparação com os YBCO policristalinos (Pina, 2010). Apresentam um elevado desempenho como SAT e são bastante utilizados em magnetos permanentes e mais recentemente, em motores elétricos e sistemas de transporte de energia ¹.

A figura 2.7 mostra um exemplo de blocos maciços compostos por materiais supercondutores desenvolvidos pelas empresas *Can Superconductors* e *Nexans*. Com base no disco maciço da figura 2.7(a), estes podem apresentar diferentes valores de diâmetro, variando entre 14 mm e 77 mm a uma temperatura crítica de 90 K ².

Os tubos cilíndricos de blindagem magnética comercializados pela empresa alemã *Nexans*, representados na figura 2.7(b) podem atingir cerca de 200 mm de diâmetro, compostos por Bi-2212. Aquando da sua utilização, a empresa *Nexans* sugere a união destes tubos de modo a formarem blocos com dimensões superiores resultando numa capacidade de blindagem quase inalterada. Quando sujeitos a temperaturas de 10 K, os tubos apresentam densidades de corrente de, aproximadamente, 20 kA /cm² proporcionando maior blindagem ³.

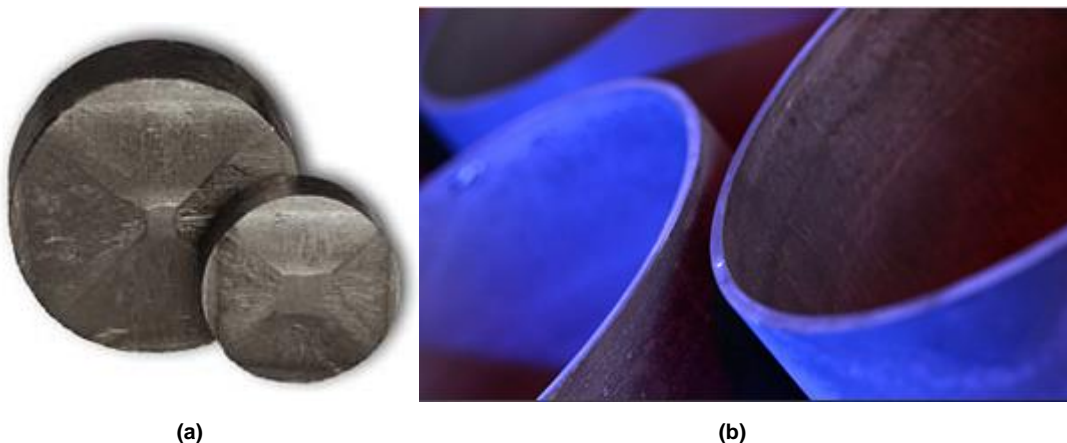


Figura 2.7 – Discos e tubos supercondutores maciços desenvolvidos pelas empresas *Can Superconductors* e *Nexans*. (a) Disco maciço de levitação magnética composto por YBCO. (b) Tubo de blindagem magnética composto por BSCCO 2212. (Fonte: <http://www.can-superconductors.com/levitation-bulk.html>) (Último acesso dia 31 de Julho de 2014); Fonte: http://www.nexans.de/eservice/Germany-en/navigate_299973/Components.html (Último acesso dia 31 de Julho de 2014)).

2.3 Aplicações dos Supercondutores na Rede Elétrica

¹ Fonte: <http://www.evico.de/en/superconductor-material/ybco-bulk-materials/> (Último acesso dia 31 de Julho de 2014)

² Fonte: <http://www.can-superconductors.com/levitation-bulk.html> (Último acesso dia 31 de Julho de 2014)

³ Fonte: http://www.nexans.de/eservice/Germany-en/navigate_299973/Components.html (Último acesso dia 31 de Julho de 2014)

Na rede elétrica, os SAT apresentam variadas aplicações, nomeadamente em cabos de transporte de energia, limitadores de corrente, sistemas de armazenamento de energia, limitadores de corrente, transformadores, geradores elétricos e motores elétricos⁴, entre outros. De seguida serão apresentados exemplos de algumas aplicações.

2.3.1 Limitadores de Corrente

Os limitadores de corrente apresentam impedância desprezável em regime de funcionamento normal, enquanto que, em regime de funcionamento em falha, a impedância é elevada. Com base nos benefícios da sua utilização, apresentam reduzidas dimensões nos componentes, instalações, subestações e sistemas de energia, e proporciona alterações nas redes de energia. Apresentam um tempo de recuperação rápido aquando da ocorrência de correntes de CC, protegendo e prolongando a vida útil dos equipamentos (transformadores e disjuntores, entre outros) (Hassenzahl, et al., 2004).

Algumas das vantagens da utilização de limitadores de corrente reside na segurança e na qualidade da energia, bem como, a minimização da manutenção periódica dos equipamentos danificados devido às falhas na rede elétrica. Os limitadores de corrente são bastante utilizados em sistemas de potência, sistemas industriais e em redes de distribuição e transmissão de energia.

2.3.2 Cabos de Energia

Os cabos compostos por materiais supercondutores tornam-se numa solução aliciante ao oferecerem a possibilidade de transportar o mesmo valor de potência que os cabos convencionais com um menor custo energético. Em contrapartida, apresentam custos adicionais na implementação do sistema de criogenia e na manutenção. Comparativamente aos cabos convencionais, os cabos compostos por SAT apresentam uma maior estabilidade, melhor condutividade elétrica e permitem o transporte de energia com valores de correntes superiores⁵.

A figura 2.8 ilustra dois tipos de cabos SAT desenvolvidos pela empresa *Nexans* e pela *SuperPower*[®], respetivamente. A figura 2.8(a) apresenta um cabo com uma fase onde existe a separação total da estrutura de cabo e em que cada fase possui o seu próprio crióstato. No caso da figura 2.8(b), o cabo é composto por um núcleo de três fases separadas entre si e entrelaçadas umas nas outras partilhando o mesmo crióstato.

⁴ Fonte: <http://www.superpower-inc.com/content/hts-materials-technology> (Último acesso dia 19 de Setembro de 2014)

⁵ Fonte: <http://www.superpower-inc.com/content/hts-transmission-cable> (Último acesso dia 19 de Setembro de 2014)

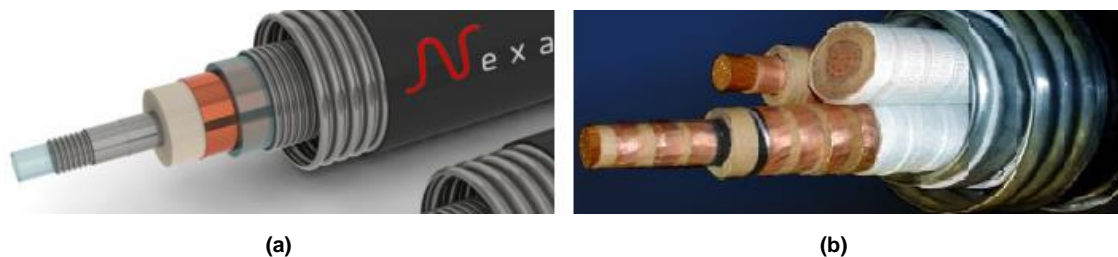


Figura 2.8 - Cabos de energia compostos por SAT. (a) Cabo de uma fase da Nexans. (b) Cabo de três fases da SuperPower® (Fonte: <http://www.superpower-inc.com/content/hts-transmission-cable#> (Último acesso dia 7 de Agosto de 2014)) (Fonte: http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigate_-10 (Último acesso dia 7 de Agosto de 2014)).

Desta forma, aquando de um CC na linha, um cabo convencional composto por cobre, permite que a corrente de falha circule por caminhos paralelos. Sendo assim, em caso de falha num cabo composto por material supercondutor (Eckroad, 2009), a corrente de CC será distribuída entre o cabo convencional e o cabo composto por SAT. A capacidade de transporte de energia é superior, comparativamente aos cabos convencionais, há uma diminuição nas perdas, a implementação pode ser feita recorrendo a uma infraestrutura dimensionada e preparada para a instalação de cabos convencionais (Eckroad, 2009).

Os cabos compostos por SAT não apresentam a capacidade de restabelecer o fornecimento de energia após uma falha na rede, nem a capacidade de normalização das temperaturas para que o material volte ao estado supercondutor. Como tal, um cabo SAT deve ter a capacidade de ter uma alternativa até que a temperatura de operação volte ao normal (Eckroad, 2009).

2.3.3 Transformadores SAT

Os transformadores compostos por materiais SAT representam uma mais-valia tanto a nível económico, como operacional e ambiental em comparação com os transformadores convencionais. Um dos benefícios da utilização dos transformadores SAT ao invés dos convencionais centra-se na possibilidade de funcionarem em sobrecarga sem perdas adicionais. Neste sentido, leva a que haja um menor esforço e desgaste do material isolante aumentando assim a vida útil do dispositivo (Morandi, et al., 2008). No caso dos transformadores convencionais, estes utilizam óleos para o arrefecimento, que por acidente poderá provocar riscos ambientais através de incêndios.

Estes dispositivos apresentam dimensões e peso inferiores, bem como maior flexibilidade comparativamente aos transformadores convencionais, levando a um menor custo de potência entregue à rede. A sua função centra-se na transformação de tensão, levando à proteção dos dispositivos e equipamentos em caso de falha na rede. Torna-se um benefício bastante atrativo. (López-Fernández, Bülent Ertan, & Turowski, 2013) (Morandi, et al., 2008).

Os transformadores SAT são constituídos por um núcleo ferromagnético com menores dimensões relativamente aos convencionais, permitindo assim a redução do tamanho e do peso que ocupam. Possuem dois enrolamentos compostos por materiais SAT nomeadamente por fitas BSCCO e YBCO-123 (Pronto, 2010) (López-Fernández, Bülent Ertan, & Turowski, 2013).

2.4 Limitador de Corrente Supercondutor Indutivo

Consoante o tipo de ligação que estabelecem com a linha, existem três tipos de LCS, sendo o limitador de corrente resistivo, o limitador de corrente indutivo e o limitador de corrente retificador. O limitador de corrente resistivo encontra-se em série com a linha, enquanto que, o limitador de corrente indutivo pode ser descrito como um transformador em que o enrolamento secundário encontra-se em CC e o enrolamento primário em série com a linha. No limitador de corrente indutivo, a linha e o enrolamento secundário estabelecem ligações magnéticas, onde se irá incidir a presente dissertação. Por outro lado, quando existe uma ponte retificadora entre a linha e o material supercondutor dá-se o nome de limitador de corrente retificador (Pina, 2010).

De modo a proteger as falhas que ocorrem nas linhas de distribuição e no transporte de energia são colocados dispositivos, denominados limitadores de corrente na rede elétrica. Se ocorrer uma falha na linha, esta poderá acontecer devido a condições atmosféricas (relâmpagos) ou devido a um contacto accidental entre as linhas de transmissão da rede de energia, entre outros. Aquando destes acontecimentos a corrente na rede poderá aumentar abruptamente, o que irá provocar danos no equipamento e falhas na rede elétrica (Plakida, 2010) (Semperger, et al., 2000).

Neste caso, os materiais supercondutores, especialmente os SAT, podem oferecer uma solução bastante eficiente para os problemas de falhas na rede elétrica. A utilização de materiais supercondutores na constituição de um LCS minimiza os danos no equipamento que constitui a rede em caso de falha, na medida em que, ao exceder-se a corrente crítica do material supercondutor, este passa para o seu estado normal (Plakida, 2010) (Semperger, et al., 2000).

Existem vários tipos de LCS indutivos consoante o tipo de ligação magnética que estabelecem com a linha. Contudo apenas se dará ênfase aos LCS de Blindagem Magnética, no qual se irá basear a presente dissertação e nos LCS de Núcleos Saturados (Pina, 2010). Atendendo à figura 2.9 é possível observar o esquema elétrico do LCS do tipo indutivo ou de blindagem magnética, em que o enrolamento primário é composto por fio de cobre, e em consequência encontra-se ligado em série com a linha onde estabelece ligações magnéticas com enrolamento secundário. O enrolamento secundário é composto por material supercondutor,

nomeadamente, um material SAT e tem como principal objetivo blindar o fluxo magnético gerado pelo enrolamento primário, de modo a que este não penetre no núcleo ferromagnético em regime de funcionamento normal (Arsénio, 2012).

Com o intuito de manter o material no estado supercondutor, no caso dos materiais SAT, uma das soluções centra-se na utilização de azoto líquido a 77 K que será colocado num crióstato onde se encontra inserido o material supercondutor, mantendo-o no estado supercondutor.

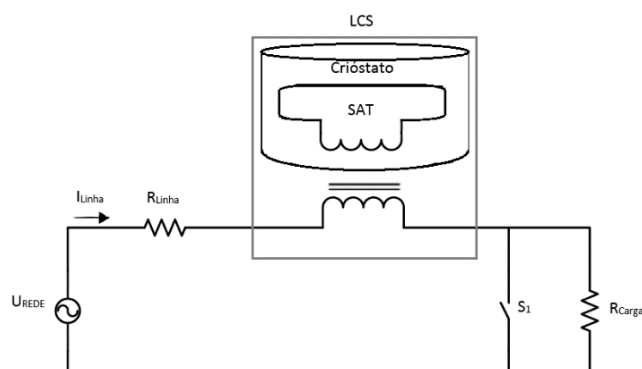


Figura 2.9 – Representação do esquema elétricos do LCS do tipo indutivo.

Em regime de funcionamento normal, o enrolamento secundário impede que o campo magnético gerado pelo enrolamento primário penetre no núcleo ferromagnético, em que este é blindado pelo material supercondutor e como tal, o campo magnético não alcança o núcleo ferromagnético. A impedância do LCS deverá ser, aproximadamente, zero devido à resistência do enrolamento primário e pelas linhas de dispersão geradas pelo LCS (Pina, 2010).

Em regime de falha na rede, ocorre um aumento considerável no valor da corrente que atravessa o enrolamento primário, o que irá provocar um aumento na corrente no enrolamento secundário (correntes de CC na rede). O campo magnético criado pela corrente no enrolamento primário é superior ao campo magnético crítico do enrolamento secundário, levando ao aumento da impedância do circuito devido à variação de fluxo no núcleo do LCS. Ocorre a penetração das linhas de fluxo magnético no núcleo ferromagnético e como tal, o enrolamento secundário deixa de blindar o fluxo magnético, perdendo as suas propriedades supercondutoras encontrando-se no estado normal.

De modo a ilustrar os dois modos de funcionamento do LCS do tipo indutivo, a figura 2.10 demonstra o comportamento das linhas de fluxo magnético para o LCS em regime de funcionamento normal e em regime de falha, respetivamente, realizados no *software* Flux2D®. É ainda possível observar que o LCS é composto por um núcleo ferromagnético, um enrolamento primário de cobre e um enrolamento secundário composto por fita SAT.

No caso na figura 2.10(a), o LCS encontra-se a operar em regime de funcionamento normal e é possível observar que o enrolamento secundário encontra-se no estado supercondutor e a blindar o núcleo ferromagnético, não havendo a penetração das linhas de fluxo magnético. É possível verificar que o fluxo magnético encontra-se condensado perto do material supercondutor e ligeiramente perto do enrolamento primário. Neste caso, a queda de tensão no limitador de corrente quando o enrolamento secundário se encontra no estado supercondutor, é bastante baixa (Kozak, et al., 2004).

Enquanto que na figura 2.10(b), o LCS encontra-se a operar em regime de funcionamento em falha, onde ocorre um aumento abrupto na corrente e o material supercondutor perde a capacidade de blindar o núcleo ferromagnético do LCS. Desta forma ocorre a penetração das linhas de fluxo magnético no interior do núcleo em que o material supercondutor deixa de se encontrar no estado supercondutor e passa a encontrar-se no estado normal. Neste caso, verifica-se o aumento da densidade de fluxo magnético sendo esta representada pelas linhas amarelas na figura 2.10(b).

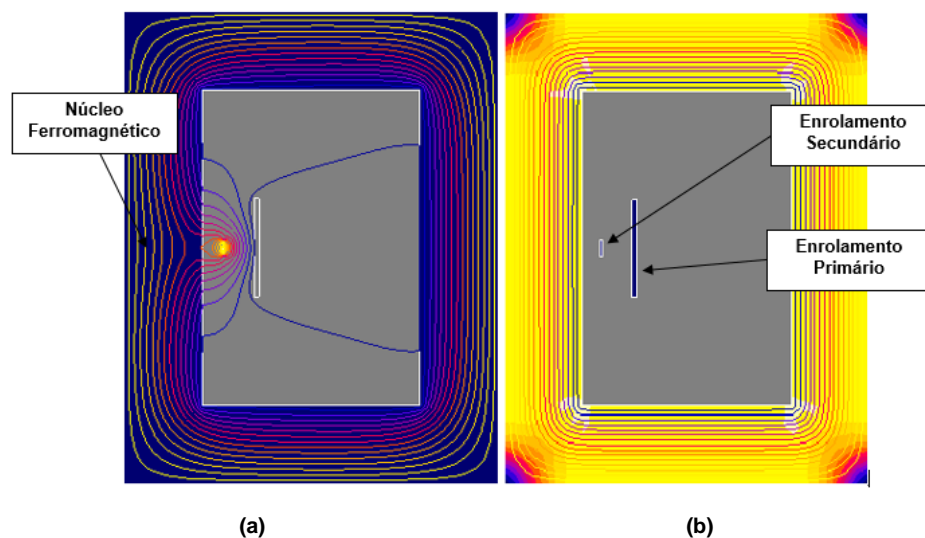


Figura 2.10 – Densidade de fluxo magnético. (a) Regime de funcionamento normal (b) Regime de funcionamento em falha.

2.4.1 Estado da Arte

Com o passar dos anos, os consumos de energia aumentam cada vez mais e em consequência, as correntes de CC ocorrem com maior frequência nos sistemas elétricos, tornando-se num desafio para a segurança nos sistemas de transporte e distribuição. A resolução do impacto das correntes de CC evita danificar o equipamento, proporciona melhor qualidade da energia e promove a segurança de todo o sistema (Kovalsky, Yuan, Tekletsadik, & Keri, 2005).

Na maior parte das vezes, as correntes de CC são bastante superiores às capacidades do dispositivo instalado, o que poderá provocar danos nos equipamentos (nomeadamente em disjuntores, transformadores, barramentos, entre outros) e consequentemente levam ao aumento do risco de acidente.

Algumas vantagens subjacentes à utilização de limitadores de corrente com o intuito de proteger a rede das correntes de CC baseiam-se na estabilidade que proporcionam ao sistema de distribuição de energia, confere proteção aos equipamentos, redução de custos de manutenção evitando assim a substituição de todo o equipamento.

Os disjuntores são colocados no interior das subestações de transmissão com o intuito de as proteger das falhas que poderão ocorrer e assim preservar todo o equipamento. Caso haja modificações na constituição da rede elétrica, as correntes de CC poderão aumentar para além da capacidade dos equipamentos e como tal, este problema poderá ter várias soluções, entre as quais se destaca a modificação das subestações (Kovalsky, Yuan, Tekletsadik, & Keri, 2005).

Existem variadas soluções para suprimir a ocorrência de correntes de CC nas linhas de transmissão de energia. Algumas dessas soluções centram-se na construção de novas subestações com o intuito de corrigir imediatamente o problema, porém, este método torna-se pouco viável devido ao seu elevado custo de instalação (Kovalsky, Yuan, Tekletsadik, & Keri, 2005). Outras formas de resolver este problema centra-se na troca de equipamento, o que torna pouco viável, tanto a nível económico como de operação, levando a que as subestações tenham que cessar funções até o problema ficar resolvido.

A utilização de um LCS do tipo indutivo torna-se numa solução conveniente, na medida em que estes dispositivos são capazes limitar as correntes de CC sem interromper o funcionamento normal do circuito (Ribeiro, 2008). Como tal, o LCS torna-se num recurso com garantias de qualidade e estabilidade na rede de energia, preservando o correto funcionamento dos equipamentos envolvidos, sem os danificar. Uma das desvantagens da sua utilização centra-se nas suas dimensões e no peso dos limitadores face aos limitadores do tipo resistivo (Noe, 2013).

Após a descoberta dos materiais SAT, os estudos nesta área tecnológica têm vindo a expandir nos últimos anos, nomeadamente em evoluções relacionadas com limitadores de corrente. Tal como foi referido anteriormente, os LCS podem-se classificar em vários tipos, particularmente em limitadores de corrente de blindagem magnética e em limitadores de correntes de núcleos saturados. Os LCS de blindagem magnética, no contexto da presente dissertação, possuem um enrolamento primário composto por cobre, um enrolamento secundário constituído por

material SAT, um criostato com o intuito de submergir o material supercondutor em azoto líquido e um núcleo composto por material ferromagnético.

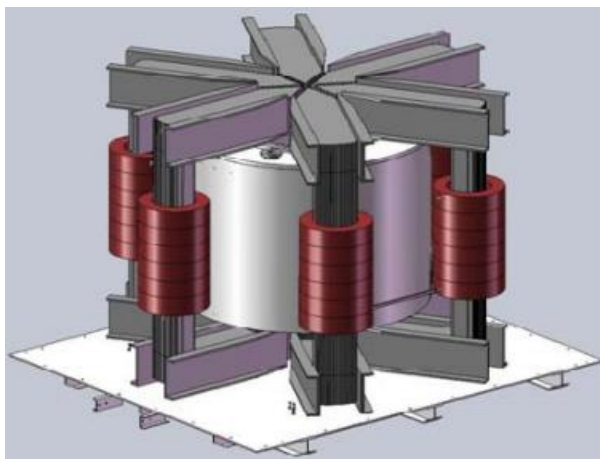
Em 1997, a empresa ABB (*Asea Brown Bowery*) desenvolveu e instalou um limitador de corrente de blindagem magnética numa central hidroelétrica na Suíça com uma potência de 1,2 MVA com tensão e correntes nominais de 10,5 kV e 70 A, tal como se pode observar na figura 2.11. O LCS é composto por anéis cerâmicos compostos por BSCCO 2212 (Weinstock, 2000) (Paul, et al., 1998).



Figura 2.11 – Limitador de Corrente Supercondutor de Blindagem Magnética com 12 kV desenvolvido pela empresa ABB (Paul, et al., 1998).

Alguns anos mais tarde, outra empresa na área do desenvolvimento e produção de limitadores de corrente para aplicações nas redes de energia, a *Zenergy Power Inc.* localizada em San Francisco nos Estados Unidos da América, destina-se ao fabrico de limitadores de corrente supercondutor de núcleos saturados, desenvolveu e testou um limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados (Moriconi, De La Rosa, Darmann, Nelson, & Masur, 2010).

Com base na figura 2.12(a) é possível observar o *design* do limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados implementado na rede de distribuição na Califórnia, Estados Unidos da América. Este é composto por seis núcleos de ferro para as três fases que o constituem com um valor de tensão 12 kV e com uma corrente máxima de 800 A, sendo ainda constituído por uma bobina com material SAT. A figura 2.12(b) ilustra o limitador real desenvolvido pela empresa *Zenergy Power Inc.*



(a)



(b)

Figura 2.12 - Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados com 12 kV desenvolvido pela empresa *Zenergy Power Inc.* (a) *Design* do Limitador de Corrente. (b) *Aspetto real* do Limitador de Corrente Supercondutor (Fonte: <http://www.htspeerreview.com/2009/pdfs/presentations/day%203/applications/2-Zenergy-Fault-Current-Limiter.pdf>) (Último acesso dia 7 de agosto de 2014)).

Em 2010, a rede de distribuição na Califórnia sofreu uma falha induzida devido a raios e o dispositivo limitou a corrente de CC, tal como seria esperado. Alguns anos mais tarde em 2010, a empresa *Zenergy Power Inc.* voltou a apresentar uma nova versão do limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados para aplicações em média tensão⁶ (69 kV) e para alta tensão⁷ (138 KV).

⁶ Média Tensão (1-60 kV)

⁷ Alta Tensão (≥ 60 kV)

3 Descrição da Metodologia

3.1 Introdução

Um LCS indutivo pode ser modelado como um transformador, na medida em que ambos são compostos por dois enrolamentos, um primário e um secundário e podem ser constituídos ou não por um núcleo ferromagnético. O enrolamento secundário do LCS encontra-se em CC e o enrolamento primário em série com a linha. O enrolamento secundário é composto por fita supercondutora e tem como principal função blindar o fluxo magnético de modo a que este não penetre no núcleo ferromagnético do LCS. O enrolamento primário e o secundário encontram-se unidos com base em ligações magnéticas, sendo estas as ligações um ponto fulcral na presente dissertação.

Tal como foi explicado no *Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica*, em regime de funcionamento normal, a impedância do LCS é aproximadamente zero em que a corrente gerada pelo enrolamento primário é blindado pelo enrolamento secundário (ocorrendo o efeito Meissner) e consequentemente as linhas de fluxo magnético penetram no núcleo ferromagnético (Gessinger, 2009).

Em regime de funcionamento em falha, a corrente que atravessa o enrolamento primário sofre um aumento considerável levando a um aumento na corrente no enrolamento secundário. Ocorre a penetração das linhas de fluxo do campo magnético no núcleo ferromagnético do LCS e como tal, o enrolamento secundário deixa de desempenhar o seu papel deixando assim de blindar o fluxo magnético.

Centrando-se nos pontos fulcrais da presente dissertação pressupôs-se o estudo e a análise de três topologias de LCS do tipo indutivo em regime de funcionamento normal focando-se em algumas parâmetros como é o exemplo da corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético. De modo a proceder-se ao desenvolvimento e consequente simulação do desempenho das três topologias, utilizou-se o *software* de elementos finitos Flux2D® da Cedrat. Os resultados das simulações referentes às três topologias terão como base a análise das seguintes parâmetros:

1. **Corrente no Enrolamento Secundário:** o enrolamento secundário é composto por material supercondutor e tem como principal função blindar o fluxo magnético.

Quando se aplica uma corrente alternada no enrolamento primário do LCS, este gera um campo magnético proporcional à intensidade dessa corrente, bem como ao número de espiras no enrolamento primário. Sendo que o fluxo magnético que circula no núcleo do LCS alcança o enrolamento secundário e ocorre o fenômeno de indução eletromagnética, há o aparecimento de uma corrente no material supercondutor que depende da corrente no enrolamento primário. Caso se aumente ou diminua o número de espiras no enrolamento primário, espera-se que a corrente no SAT aumente ou diminua, respectivamente. Num LCS do tipo indutivo, tal como acontece num transformador, a relação entre as correntes e o número de espiras dos enrolamentos, é dada pela expressão (3.1):

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.1)$$

Onde:

- I_1 : Corrente no enrolamento primário [A];
- I_2 : Corrente no enrolamento secundário [A];
- N_1 : Número de espiras do enrolamento primário;
- N_2 : Número de espiras do enrolamento secundário.

Considerando a expressão (3.1) verifica-se que a corrente no enrolamento primário aumenta, caso o número de espiras no SAT aumente, e poderá diminuir caso o número de espiras no enrolamento secundário diminua. Assim, com base no estudo na corrente no enrolamento secundário, é possível observar que quanto maior for o número de espiras no enrolamento primário, maior será a corrente no enrolamento secundário, que neste caso é representado pelo material SAT.

Com base na distância entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário, espera-se que não ocorram alterações na corrente no SAT, na medida em que a distância entre ambos não apresenta qualquer influência na corrente que atravessa o enrolamento secundário.

- 2. Queda de Tensão aos Terminais do LCS:** em regime de funcionamento normal, quando o enrolamento secundário se encontra envolto no núcleo ferromagnético do LCS, faz com que a indutância seja bastante baixa, sendo esta próxima de zero, levando ao aparecimento de queda de tensão aos terminais do LCS (Kosak, Janowski, Kozak, Wojtasiewicz, & Glowacki, 2006) (Heydari, Abrishami, & Bidgoli, 2013).

Quando o LCS encontra-se a operar em regime de funcionamento normal, sendo este invisível perante a rede, o enrolamento secundário que se encontra em CC tem a função de blindar o núcleo ferromagnético de modo a evitar a variação de fluxo magnético no núcleo. Deste modo, como não ocorre a variação de fluxo magnético no núcleo, leva a que a tensão aos terminais

do LCS seja zero. Este fenómeno justifica-se graças à força magnetomotriz (fmm) criada pelo enrolamento primário que anula a fmm gerada pelo enrolamento secundário (Arsénio, 2012) (Pina, 2010) (Tleis, 2008). Porém, o ideal seria que a queda de tensão aos terminais do LCS fosse zero, mas espera-se que não seja totalmente zero o que permite verificar que a “invisibilidade” do LCS perante a rede não é total.

Como será explicado na secção seguinte, uma das parâmetros a estudar corresponde ao fluxo ligado com o enrolamento primário e neste sentido, caso o LCS não seja totalmente invisível perante a rede, faz com que a queda de tensão aos terminais do LCS seja diferente de zero.

Centrando-se nos resultados que se irão obter com o *software* Flux2D®, espera-se que a queda de tensão aos terminais do LCS aumente, caso o número de espiras no SAT diminua, e poderá diminuir caso o número de espiras no enrolamento secundário aumente. Como tal, aquando do estudo da queda de tensão aos terminais do LCS, pode-se esperar que, quanto maior for o número de espiras no primário, maior será a queda de tensão aos terminais do LCS.

Porém, na eventualidade de se adicionar uma espira ao enrolamento secundário, espera-se que o processo seja igual, havendo então menor queda de tensão aos terminais do LCS.

- 3. Fluxo Ligado com o Primário:** em regime de funcionamento normal, idealmente o LCS é invisível perante a rede elétrica e como tal, o fluxo ligado com o enrolamento primário é bastante próximo de zero devido facto de não ocorrer a variação de fluxo magnético no núcleo ferromagnético. Em contrapartida, caso haja fluxo ligado, pode-se verificar que o LCS não se encontra totalmente invisível perante a rede levando à existência de queda de tensão aos terminais do LCS.

Perante as simulações a realizar no *software* Flux2D®, espera-se que o fluxo ligado com o primário apresente valores bastante baixos, evidenciando assim que o LCS não se encontra totalmente invisível para com a rede elétrica. Porém, como não se trata do caso ideal, é bastante aceitável a presença de fluxo ligado com o primário levando a que haja queda de tensão aos terminais do LCS, como explicado anteriormente. No que respeita ao número de espiras no enrolamento primário e no enrolamento secundário, espera-se que quanto maior número de espiras, menor será o valor do fluxo ligado, havendo assim maior blindagem magnética ao núcleo ferromagnético do LCS.

Espera-se que o fluxo ligado aumente consoante o aumento da distância entre os enrolamentos, ou seja, quanto maior a distância entre ambos, menor será a distribuição das linhas de fluxo magnético e maior será a dispersão das linhas, e consequentemente, o LCS torna-se cada vez menos invisível perante a rede. Neste sentido, o comportamento do

enrolamento secundário justifica uma maior blindagem magnética ao núcleo ferromagnético, levando ao decréscimo do valor da queda de tensão aos terminais do LCS.

- 4. Densidade de Fluxo Magnético:** em funcionamento normal, o material supercondutor blinda o fluxo magnético e como tal, não ocorre o aparecimento de linhas de fluxo magnético no interior do núcleo do LCS. O enrolamento primário e o secundário estabelecem ligações magnéticas entre si graças à variação do fluxo magnético no núcleo do LCS e como tal, a sua existência deve-se à corrente nos enrolamentos.

De acordo com a figura 3.1, para que a fita mantenha as suas propriedades supercondutoras, o valor da densidade de fluxo magnético e as linhas de campo magnético têm que ser paralelas à superfície da fita SAT, segundo os gráficos traçados com base no catálogo da Fita da *American Superconductor* com o modelo *HTS High Strength Plus Wire*. Neste sentido, as linhas de densidade de fluxo magnético têm que ser paralelas à fita SAT, consoante os valores descritos nas imagens 3.1(a) e 3.2(b).

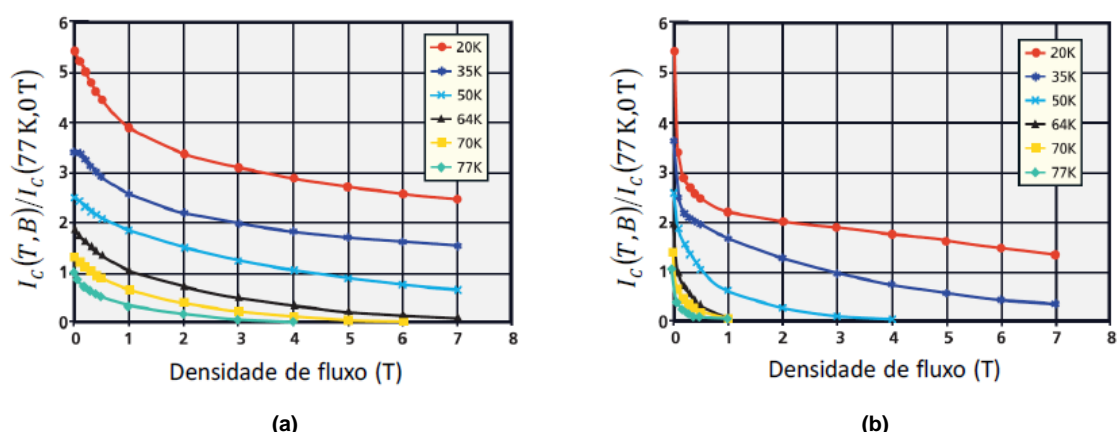


Figura 3.1 - Degradação da densidade de corrente crítica na presença de campos magnéticos. Gráficos elaborados com base num catálogo da empresa *American Superconductor* para uma fita com o modelo *HTS High Strength Plus Wire* (<http://www.amsc.com/>) (Pina, 2010) (a) Densidade de fluxo paralela à superfície da fita SAT. (b) Densidade de fluxo perpendicular à superfície da fita SAT.

Espera-se que o número de espiras nos enrolamentos e a distância entre ambos não constitua um fator discrepante no valor da densidade de fluxo magnético nem no facto das linhas de campo magnéticos serem paralelas.

3.2 Princípio de Funcionamento

Como foi referido anteriormente, cada uma das três topologias a simular são constituídas por um núcleo ferromagnético, um enrolamento primário e por um enrolamento secundário composto por material SAT.

O núcleo ferromagnético do LCS é constituído por material ferromagnético, geralmente chapas de ferro isoladas entre si por um isolante (verniz, entre outros) com o intuito de evitar a formação de correntes induzidas no interior do núcleo (Correntes de Foucault) quando este for percorrido por fluxo de indução magnética.

O enrolamento primário é composto por espiras em cobre e encontra-se ligado em série com a linha. A sua função centra-se na geração de fluxo magnético, que em caso de CC, penetra no núcleo ferromagnético de modo a limitar a corrente que o atravessa.

O enrolamento secundário encontra-se em CC é composto por material SAT que estabelece ligações magnéticas com o enrolamento primário. De modo a que o material possua propriedades supercondutoras e consoante o tipo de material se trate, este é mergulhado em azoto líquido a 77 K de modo a que o SAT atinja a sua temperatura crítica. Caso isso aconteça, este deixa de ter propriedades supercondutoras e passar a encontrar-se no seu estado normal.

Em regime de funcionamento normal, tal como mostra a figura 3.2(a), o LCS apresenta um comportamento invisível perante a rede elétrica e tem como principal função realizar a blindagem magnética de modo a garantir a inexistência de variação de fluxo magnético no núcleo ferromagnético. Neste caso, não existe tensão aos terminais do LCS, visto que não existe variação de fluxo no núcleo. Este fenómeno acontece porque a fmm criada pelo enrolamento primário é anulada pela fmm gerada pelo enrolamento secundário (Arsénio, 2012) (Pina, 2010) (Tleis, 2008).

Em regime de funcionamento em falha como ilustra a figura 3.2(b), quando são induzidas correntes de CC, a corrente no enrolamento secundário ultrapassa o seu valor crítico, o que significa que o material já não se encontra no estado supercondutor, ao invés, encontra-se no estado normal. Desta forma, o SAT deixa de blindar o fluxo magnético e as linhas de fluxo penetram no núcleo ferromagnético.

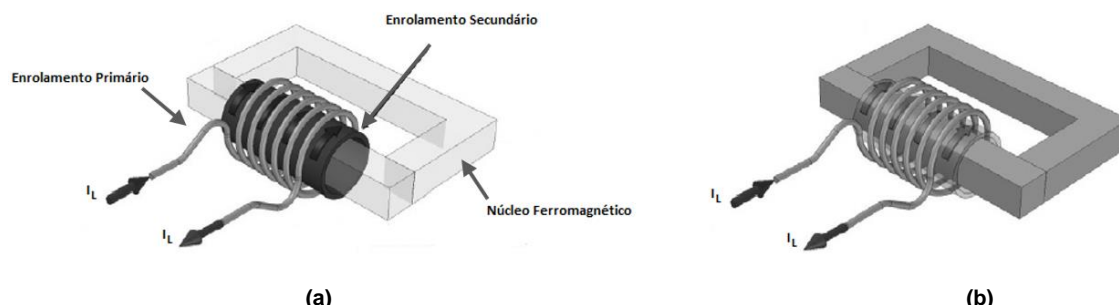


Figura 3.2 – Princípio de funcionamento de um LCS do tipo indutivo. (a) Regime de funcionamento normal: o enrolamento secundário blindar o fluxo magnético. (b) Regime de funcionamento em falha: o fluxo magnético penetra no núcleo ferromagnético e o supercondutor passa para o estado normal (Adaptado de: (Kosak, Janowski, Kozak, Wojtasiewicz, & Glowacki, 2006)).

3.3 Topologias dos Limitadores de Corrente Supercondutores

As três topologias selecionadas para o estudo e simulação no Flux2D® apresentam arquiteturas diferentes, porém são constituídas pelos mesmos materiais. Primeiramente, simulou-se a T1, seguidamente, a T2 presentes em (Pina, 2010) e por fim, simulou-se a T3.

Numa primeira fase, realizou-se a simulação das três topologias em regime de funcionamento normal, utilizando as dimensões reais do limitador. Seguidamente optou-se por aproximar o mínimo possível o enrolamento secundário do enrolamento primário e gradualmente aumentou-se a distância entre ambos.

Com base nas simulações realizadas no Flux2D® mediu-se a corrente no enrolamento secundário, a queda tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético. Numa primeira fase, o núcleo ferromagnético mantém as dimensões originais, bem como o valor da tensão de alimentação, a impedância da linha e de carga. Numa segunda fase, aumentaram-se consideravelmente as dimensões do núcleo ferromagnético e voltou-se a analisar os mesmos parâmetros. O estudo passou ainda pela variação do número de espiras nos enrolamentos.

Numa fase posterior de simulações realizou-se a alteração às dimensões do enrolamento primário em ambiente de simulação, mantendo sempre a mesma área, de modo a estudar que influências poderia ter no funcionamento do LCS com base nos parâmetros a estudar.

3.4 Síntese

O presente capítulo apresenta a descrição da metodologia a utilizar para a realização da presente dissertação, evidenciando os parâmetros a estudar como é o caso da corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético. O estudo das variáveis será feito no regime normal de três topologias diferentes de LCS do tipo indutivo.

Descreve-se o modo de funcionamento de um LCS do tipo indutivo bem como apresenta a descrição das três topologias a simular. Numa fase inicial, o estudo terá como base a simulação das três topologias em ambiente de simulação recorrendo ao *software* de elementos finitos, Flux2D®.

4 Simulação e Análise de Resultados no Software Flux2D®

O presente capítulo refere-se à simulação das três topologias do LCS, a T1, T2 e T3 no *software* Flux2D®, fazendo referência aos respetivos parâmetros a estudar, o circuito elétrico implementado, bem como, o comportamento que apresentam face aos parâmetros que se pretendem estudar.

O circuito elétrico e o respetivo dimensionamento utilizado nas simulações em ambiente de simulação trata-se do mesmo para as três topologias de modo a que os resultados sejam coerentes permitindo a comparação e análise de resultados. De modo a estudar a influência no número de espiras no enrolamento primário, realizaram-se simulações para 20, 40 e 60 espiras para os casos que se seguem.

Efetuuou-se a simulação de três casos distintos onde apenas se procedeu à modificação das dimensões do enrolamento primário mantendo sempre a mesma área e definindo 20 espiras para todos os casos. Este processo foi apenas realizado para a T1 e para a T2 tendo como principal objetivo compreender a influência das dimensões do enrolamento primário na análise da corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário, bem como a densidade de fluxo magnético.

A figura 4.1 ilustra as diferentes geometrias utilizadas para definir o enrolamento primário em ambiente de simulação, em que a figura 4.1(a) evidencia as dimensões reais do enrolamento primário para o LCS com T1 e T2. As figuras 4.1(b), 4.1(c) e 4.1(d) evidenciam as alterações efetuadas nas dimensões do enrolamento primário onde apenas se manteve a área e o numero de espiras.

Em ambiente de simulação define-se sempre a distância mínima de 0,1 mm e a distância máxima de 15 mm entre os enrolamentos para todos os casos a simular. Para esta caso, utilizou-se uma fita SAT, 90 V de tensão máxima na fonte, com uma impedância da resistência da linha de 1 Ω e uma resistência de carga de 60 Ω , para todos os casos.

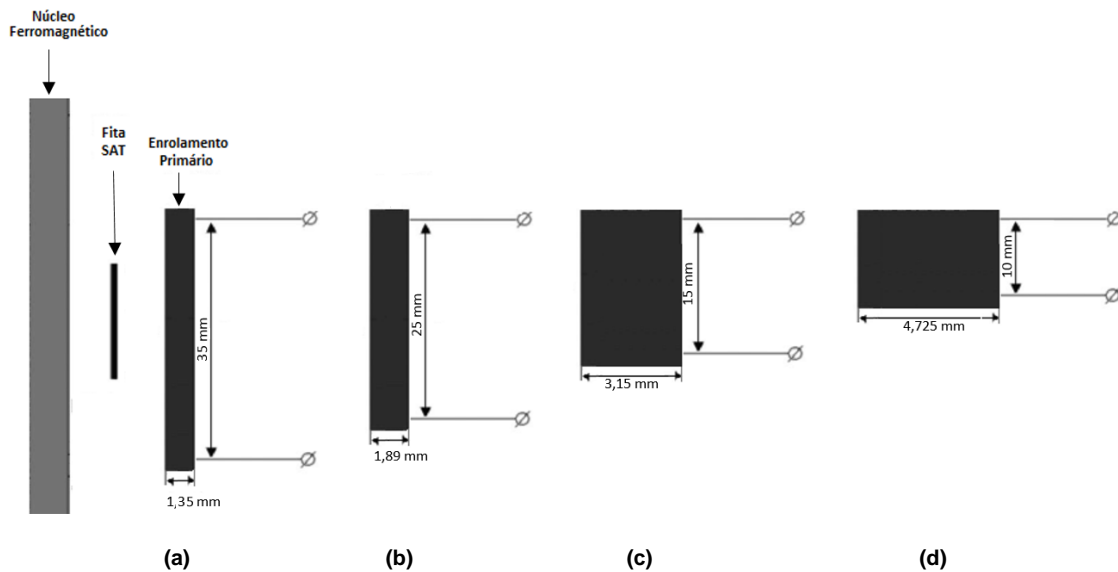


Figura 4.1 - Dimensões definidas para os três casos referentes ao enrolamento primário para a T1 e T2 com 20 espiras no enrolamento primário. (a) Caso real. (b) Caso 1. (c) Caso 2. (d) Caso 3.

Seguidamente, são apresentadas as três topologias de LCS estudados ao longo da presente dissertação, bem como a análise de resultados obtidos no *software* Flux2D® referentes à corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário, bem como a densidade de fluxo magnético.

4.1 Topologia 1

A primeira topologia a ser estudada, denominada T1, encontra-se representada na figura 4.2 e foi baseada num LCS do tipo indutivo presente na referência (Pina, 2010). Procedeu-se à alteração da localização dos enrolamentos, mantendo as dimensões originais de todos os constituintes do LCS. No *Apêndice 1 - Dimensões do Núcleo Ferromagnético com Topologia 1* e 2 encontram-se representadas as dimensões reais (em mm) do LCS com T1.

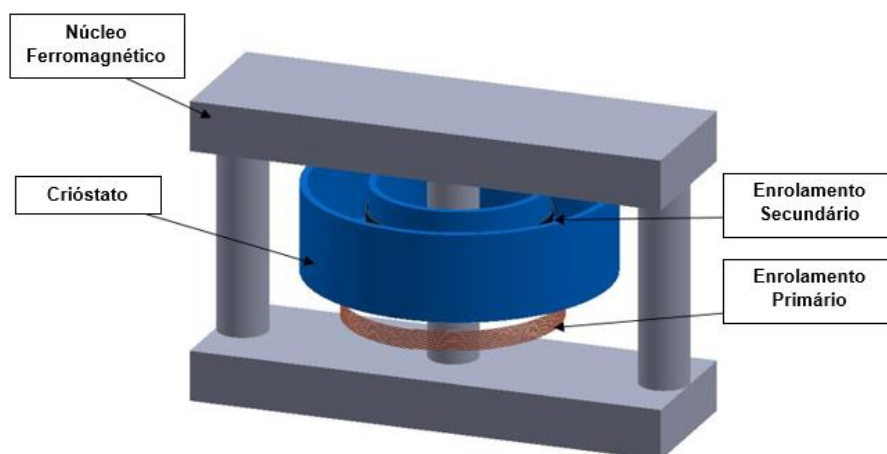


Figura 4.2 – LCS do tipo indutivo com Topologia 1.

Embora o enrolamento primário e o enrolamento secundário se encontrem isolados um do outro, estes estabelecem ligações magnéticas, em que o fluxo magnético gerado pelo enrolamento primário percorre o enrolamento secundário. Tal como foi descrito no *Capítulo 3 - Descrição das Metodologias* e com base na expressão (3.3) que relaciona a corrente nos enrolamentos com o número de espiras de ambos, procedeu-se ao dimensionamento do circuito a simular, tentando sempre manter o SAT no estado supercondutor.

Por isso, para todos os casos estudados, o valor da corrente na linha é aproximadamente 1,48 A, para todos os casos que possuam o 20, 40 e 60 espiras no enrolamento primário, tendo em conta que o valor da tensão máxima de alimentação, impedância de linha e de carga é idêntica para todos os casos. Considera-se que a corrente na linha não poderá exceder o valor calculado, visto que abaixo desse valor, o material encontra-se no estado supercondutor e acima desse valor o material encontra-se no estado normal.

Efetuarão-se quatro fases diferentes de simulações em que na primeira fase utilizam-se as dimensões originais do núcleo ferromagnético do LCS em regime de funcionamento normal e analisam-se as quatro parâmetros descritas anteriormente. Numa segunda fase realiza-se exatamente o mesmo tipo de simulação, mas aumenta-se cerca de quatro vezes as dimensões do núcleo. Neste sentido, utilizaram-se 20, 40 e 60 espiras no enrolamento primário, uma fita SAT, com 90 V na tensão máxima de alimentação, a impedância da linha apresenta o valor de $1\ \Omega$ e a resistência de carga é de $60\ \Omega$.

A terceira fase de simulações centra-se na alteração das dimensões do enrolamento primário com 20 espiras em ambiente de simulação, onde se mantém a distância entre os enrolamentos, bem como a área do enrolamento, consoante as informações da figura 4.1. A quarta fase de simulações representa um seguimento da terceira fase em que se procede ao aumento das dimensões do núcleo do LCS e analisam-se os mesmos parâmetros.

Definiu-se a distância mínima de 0,1 mm entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário e conseqüentemente deslocou-se o SAT até à distância máxima de 15 mm do enrolamento primário. Após a simulação em regime de funcionamento normal, obteve-se a corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e por fim, a densidade de fluxo magnético. Seguidamente são apresentados os resultados obtidos referentes aos parâmetros descritas anteriormente.

4.1.1 Corrente no Enrolamento Secundário

A figura 4.3 apresenta os resultados obtidos em ambiente de simulação no *software* Flux2D® onde se pode observar a corrente no enrolamento secundário quando se afasta a fita SAT do

enrolamento primário cerca de 0,1 mm e 15 mm e onde se se procedeu à variação no número de espiras do enrolamento primário.

Com base na informação contida na figura 4.3, é notório observar que consoante a diminuição do número de espiras no enrolamento primário, menor será o valor máximo da corrente no enrolamento secundário. Quando enrolamento primário apresenta 20 espiras, o valor máximo da corrente no primário é de, aproximadamente, 28,1 A, quando este possui 40 espiras a corrente máxima é de 56,74 A e quando este apresenta cerca de 60 espiras, a corrente aumenta para 86,3 A.

Com base na expressão (3.1) discutida no *Capítulo 3 – Descrição da Metodologia*, é possível observar que quanto maior o número de espiras no enrolamento primário, maior será a corrente no enrolamento secundário, e vice-versa, devido ao fenómeno de indução eletromagnética em que ocorre o aparecimento de corrente no enrolamento secundário que depende da corrente no enrolamento primário. Pode-se observar ainda que a distância entre os enrolamentos não influencia o valor da corrente máxima que atravessa o enrolamento secundário.

De modo a estudar a influência das dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, aumentaram-se as suas dimensões cerca de quatro vezes e realizaram-se novas simulações com o intuito de estudar a corrente no enrolamento secundário. Os resultados demonstraram-se bastante aproximados aos resultados obtidos para a figura 4.3 e desta forma não se verificou oportuno representá-los.

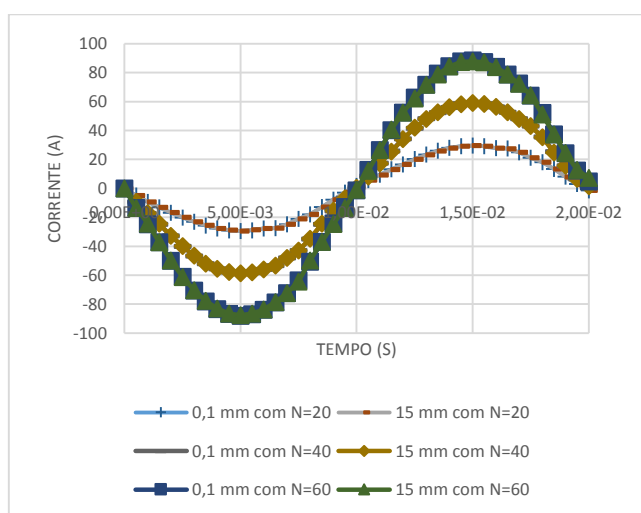


Figura 4.3 - Corrente no enrolamento secundário com T1.

Numa fase posterior, realizaram-se novas simulações no *software* Flux2D® onde apenas se procedeu à alteração das dimensões do enrolamento primário, mantendo sempre a mesma área, não interferindo nos restantes constituintes do LCS consoante as informações expressas

na figura 4.1. A figura 4.4 refere-se à corrente no enrolamento secundário obtida para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram a 0,1 mm e 15 mm de distância um do outro.

Com base na figura 4.4, é possível observar o valor da amplitude máxima da corrente no enrolamento secundário é de, aproximadamente, 29,24 A para todos os casos quando o enrolamento primário possui 20 espiras, independentemente da distância que separa os enrolamentos e das diferentes geometrias do enrolamento primário possa adquirir.

Realizaram-se novas simulações, em que apenas se aumentaram as dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, de modo a verificar a sua influência na corrente no enrolamento secundário. Os resultados demonstraram-se bastante aproximados aos resultados obtidos para a figura 4.4 e desta forma não se justificou a sua apresentação.

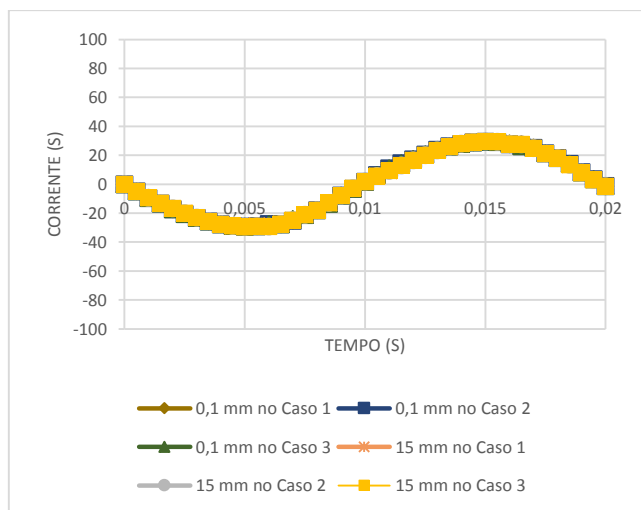


Figura 4.4 - Corrente no enrolamento secundário com T1 para os casos 1, 2 e 3.

Neste contexto, é possível observar que independentemente da distância que separa os enrolamentos, bem como a geometria do enrolamento primário, estas não interferem no valor máximo da corrente no enrolamento secundário.

Porém, o número de espiras no enrolamento primário torna-se no fator que poderá interferir no valor da amplitude máxima da corrente no enrolamento secundário. Neste sentido, atendendo à figura 4.3, quando o enrolamento primário possui 20 espiras, a corrente máxima é de 28,1 A e quando se altera a geometria do enrolamento primário, a corrente aumenta ligeiramente para 29,1 A como se verifica na figura 4.4.

4.1.2 Queda de Tensão aos Terminais do LCS

Nas figuras 4.5 e 4.6 é possível observar a queda de tensão aos terminais do LCS quando o enrolamento primário possui 20, 40 e 60 espiras e quando este se encontra afastado do SAT cerca de 0,1 mm e 15 mm, respectivamente.

Atendendo à figura 4.5(a), a queda de tensão aos terminais do LCS é de, aproximadamente, -16,4 mV quando o enrolamento primário possui 20 espiras. Quando este possui 40 espiras, o valor da queda de tensão é cerca de -70 mV quando ambos se encontram à distância mínima de 0,1 mm. Quando o enrolamento primário possui 60 espiras, a queda de tensão aumenta para -150 mV.

Focando-se nos resultados obtidos representados na figura 4.5(b), aumentaram-se as dimensões do núcleo ferromagnético do LCS para cerca de quatro vezes, e é possível observar que quando o enrolamento primário possui 20 espiras, a queda de tensão aos terminais do LCS é de, aproximadamente, -13,4 mV. Quando se aumenta o número de espiras do enrolamento primário para 40, o valor da queda de tensão é cerca de -53,9 mV. Aumentando o número de espiras para 60, a queda de tensão aos terminais do LCS assume cerca de -121,7 mV.

Contudo, é possível verificar que o aumento das dimensões do núcleo do limitador leva a uma ligeira diminuição na queda de tensão aos terminais do LCS devido à impedância desprezável. Observa-se que o LCS não é idealmente invisível perante a rede elétrica, existindo uma queda de tensão aos seus terminais para todas as situações.

De forma ilustrativa e evidenciando o valor mínimo da queda de tensão, como se observa pelas figuras 4.5(a) e 4.5(b), é possível concluir que corresponde a cerca de 0,018% e 0,015% da tensão máxima de alimentação da fonte, respetivamente.

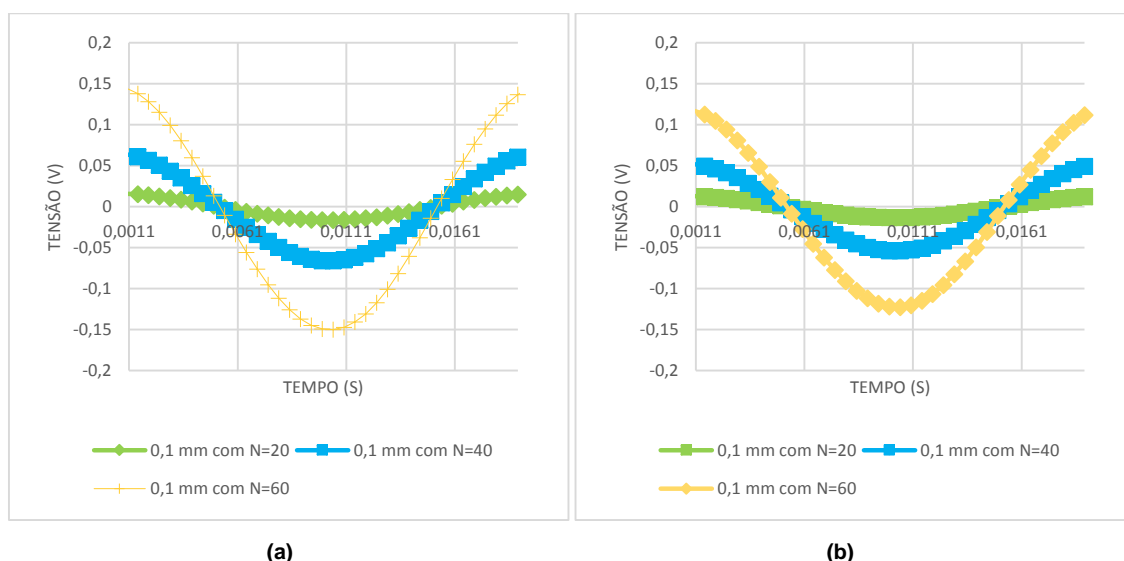


Figura 4.5 – Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Atendendo à figura 4.6(a) e 4.6(b), tem-se queda de tensão aos terminais do LCS quando os enrolamentos se encontram afastados cerca de 15 mm quando o núcleo possui as dimensões originais e quando estas são superiores, respetivamente.

Atendendo à figura 4.6(a), quando o enrolamento primário é composto por 20 espiras, a queda de tensão aos terminais do LCS atinge cerca de, -21,2 mV, quando este possui 40 espiras, o valor da queda de tensão é de cerca de -112,7 mV. Aumentando o número de espiras para 60, a queda de tensão assume cerca de -254,8 mV.

Atendendo à figura 4.6(b), após o aumento das dimensões do núcleo, estudou-se novamente a queda de tensão aos terminais do LCS e é possível observar que quando o enrolamento primário possui 20 espiras, a queda de tensão aos terminais do LCS atinge cerca de, -22,4 mV, quando este possui 40 espiras, o valor da queda de tensão é de cerca de -90,4 mV. Aumentando o número de espiras para 60, a queda de tensão assume cerca de -203,6 mV.

Tal como aconteceu na situação anterior, é possível confirmar uma diminuição na queda de tensão aos terminais do LCS quando se aumentam as dimensões do núcleo. O LCS não é idealmente invisível perante a rede elétrica, existindo uma queda de tensão aos seus terminais em ambas as situações. A título de exemplo e focando-se no valor mínimo da queda de tensão, como se observar pelas figuras 4.6(a) e 4.6(b) é possível concluir que corresponde a cerca de 0,024% e 0,025% da tensão máxima de alimentação da fonte.

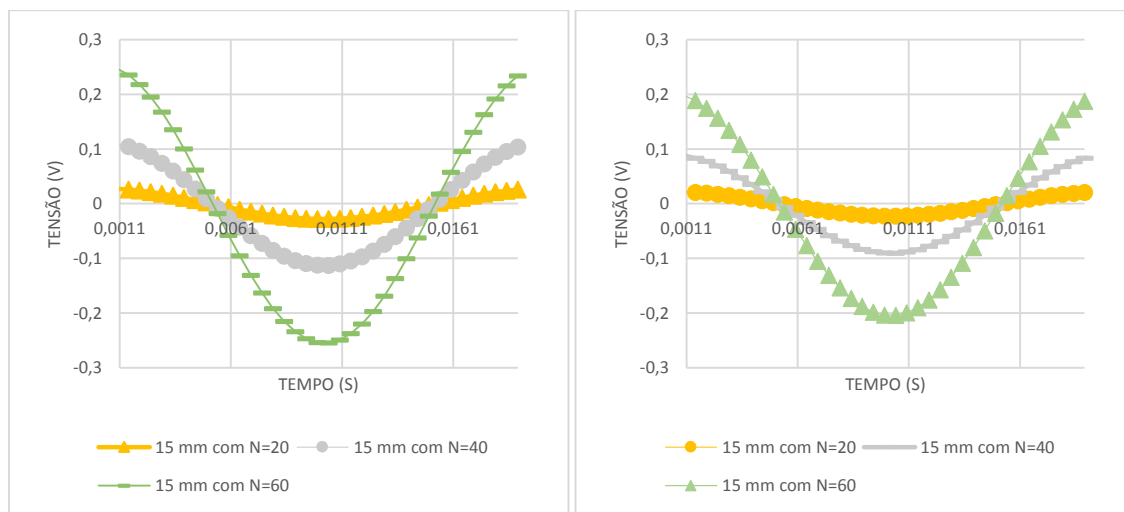


Figura 4.6 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

É possível observar que quanto menor a distância entre ambos, menor será a queda de tensão aos terminais do LCS. De outra forma, é pertinente afirmar que quanto menor for o número de

espiras que compõem o enrolamento primário, menor será o valor da queda de tensão aos terminais do LCS.

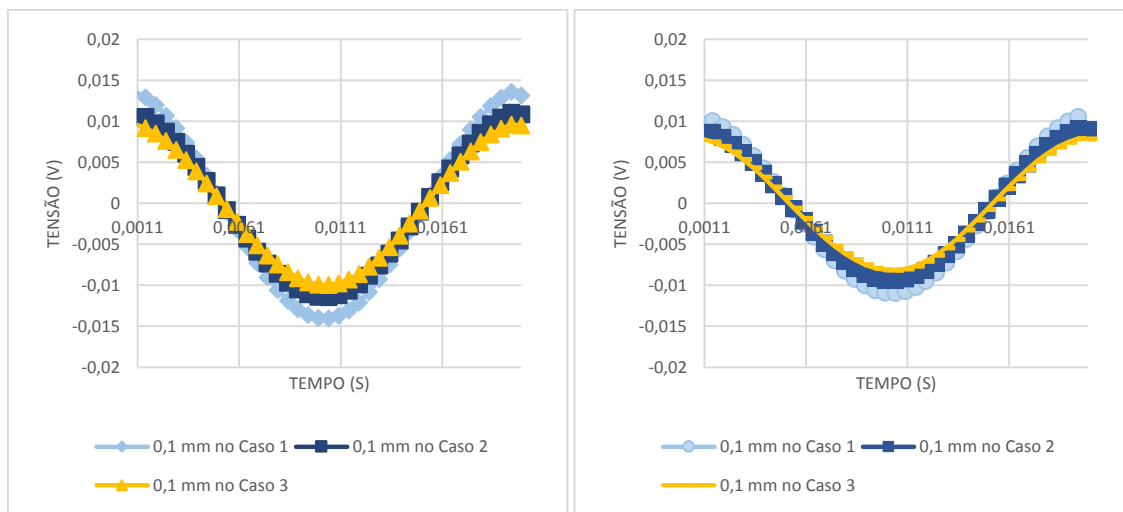
Observa-se ainda que o LCS não é idealmente invisível perante a rede elétrica, na medida em que, existe queda de tensão aos seus terminais em todos os casos anteriores.

As figuras 4.7 e 4.8 apresentam os resultados obtidos para a queda de tensão aos terminais do LCS quando o núcleo apresenta as dimensões originais e quando estas são cerca de quatro vezes superiores, respetivamente. A figura 4.7 refere-se à queda de tensão aos terminais do LCS obtida para os casos 1, 2 e 3, de acordo com as informações contidas na figura 4.1, quando os enrolamentos se encontram a 0,1 mm e o enrolamento primário apresenta 20 espiras.

Com base na figura 4.7(a), quando a distância entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário é 0,1 mm, a queda de tensão aos terminais do LCS é mínima para o caso 3, atingindo cerca de -9,8 mV. Pode-se observar que a queda de tensão aos terminais do LCS vai aumentando gradualmente em que o caso 2 apresenta uma queda de tensão superior ao caso 1, com cerca de -11,4 mV e de seguida trata-se do caso 3 com, aproximadamente, -14 mV.

Atendendo à figura 4.7(b), quando as dimensões do núcleo são superiores, a queda de tensão aos terminais do LCS é mínima para o caso 3, em que atinge cerca de -8,2 mV. Para o caso 2, a queda de tensão aos terminais do LCS é de, aproximadamente, -9,4 mV, e para o caso 1 é de -10,9 mV.

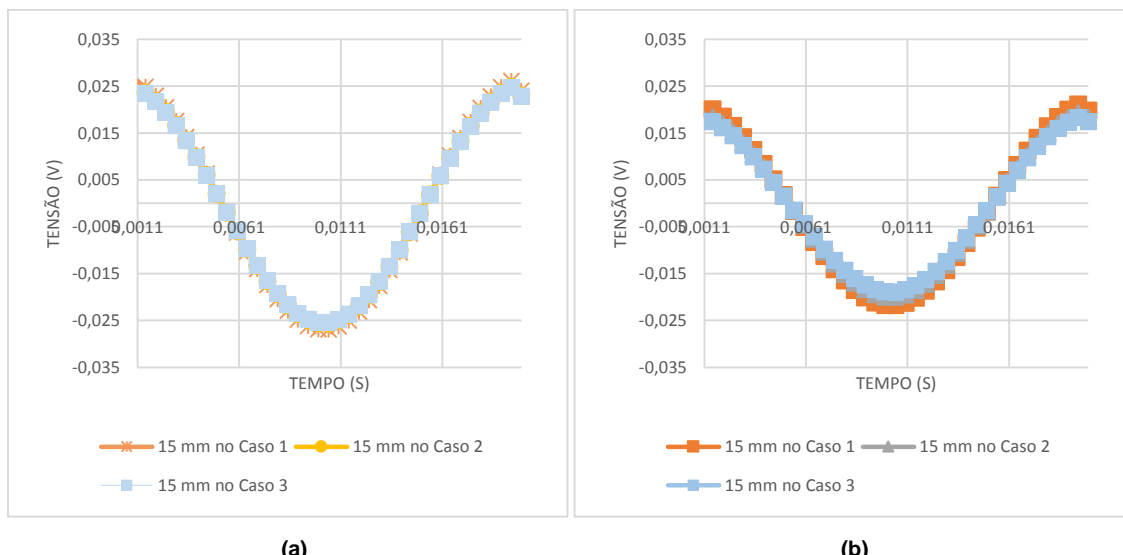
Comparando os resultados das figuras 4.7(a) e 4.7(b), é possível verificar que o aumento das dimensões do núcleo do limitador leva a um ligeiro aumento na queda de tensão aos terminais do LCS para os casos 1 e 2, tal como aconteceu para o caso anterior. De forma ilustrativa e evidenciando o valor mínimo da queda de tensão, como se observar pelas figuras 4.7(a) e 4.7(b), é possível concluir que corresponde a cerca de 0,012% e 0,009% da tensão máxima da fonte de alimentação, respetivamente.



(a) (b)
Figura 4.7 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Atendendo às informações da figura 4.8(a) quando o núcleo apresenta as dimensões originais e os enrolamentos se encontram à distância de 15 mm, a queda de tensão é de - 25,4 mV no caso 3, seguidamente para o caso 2 tem-se cerca de - 25,5 mV. Relativamente ao caso 1, a queda de tensão é de -26,9 mV. Realizando um paralelo entre o valor da queda de tensão quando se trata do enrolamento primário com as dimensões originais com as novas simulações e com base na figura 4.6 verifica-se que ocorre uma diminuição na queda de tensão quando se trata da geometria original.

Aquando do aumento das dimensões do núcleo do LCS, consoante as informações contidas na figura 4.8(b), a amplitude mínima é de - 18,9 mV no caso 3, cerca de -19,9 mV para o caso 2, - 21,7 mV para o caso 1 e para as dimensões originais, a queda de tensão é de -22,5 mV. Atendendo ao valor da queda de tensão quando se trata do enrolamento primário com as dimensões originais com as novas simulações e com base na figura 4.7 verifica-se que ocorre um aumento na queda de tensão quando se trata da geometria original.



(a) **(b)**
Figura 4.8 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Evidenciando o valor mínimo e máximo da queda de tensão aos terminais do LCS representados na figura 4.7(b), é possível observar que corresponde a cerca de 0,009% e 0,025% da tensão máxima de alimentação da fonte, respetivamente.

Com base na análise da queda de tensão aos terminais do LCS, é possível observar que quanto menor a distância entre os enrolamentos, menor será a queda de tensão aos terminais do LCS. Nos dois tipos de simulações realizadas, o caso 3 representa o caso em que ocorre uma menor queda de tensão aos terminais do LCS tornando-se na geometria em que o LCS se encontra com maior “invisibilidade” perante a rede.

Atendendo às dimensões do núcleo do LCS é possível observar ocorre um aumento na queda de tensão aos terminais do LCS, levando a que o LCS não seja invisível perante a rede.

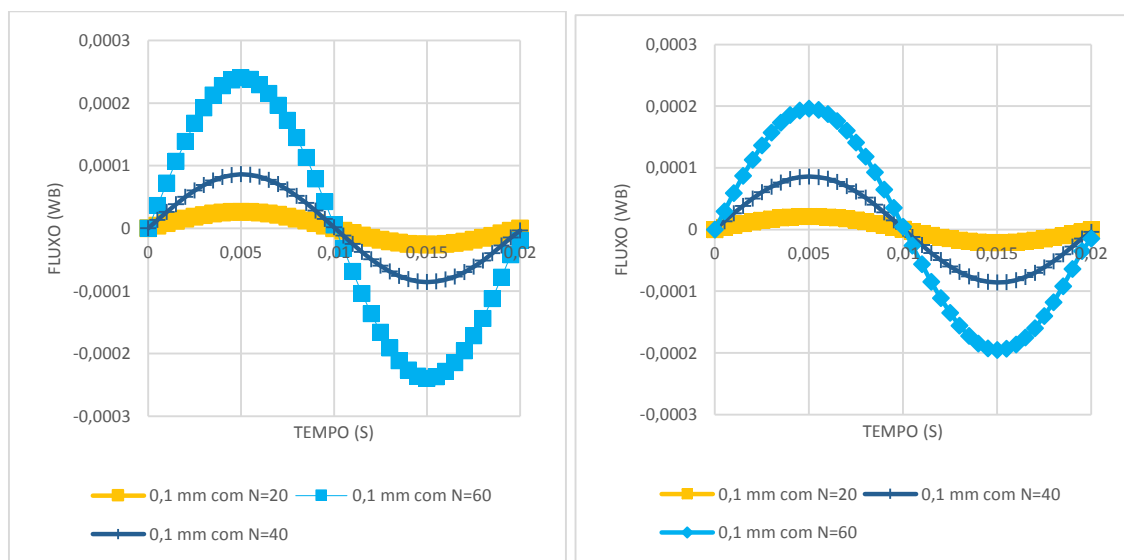
4.1.3 Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário

As figuras 4.9(a) e 4.9(b) apresentam os resultados obtidos por simulação no *software* Flux2D®, do fluxo ligado com o enrolamento primário em função do tempo, quando núcleo apresenta as dimensões originais e quando apresenta um núcleo quatro vezes maior, respetivamente.

Com base na figura 4.9(a), quando o núcleo apresenta as dimensões originais e o enrolamento primário possui 20 espiras, o fluxo ligado apresenta um valor máximo de 25,9 μWb , enquanto que para 40 espiras, o fluxo ligado com o primário apresenta um máximo de 85,2 μWb . Por fim, quando o enrolamento primário apresenta 60 espiras, o fluxo ligado é de, aproximadamente, 240 μWb .

A figura 4.9(b) mostra os resultados do valor do fluxo ligado com o enrolamento primário, quando se aumentam as dimensões do núcleo ferromagnético. É possível verificar que o valor do fluxo ligado diminui ligeiramente quando as dimensões são superiores, confirmando que quando o enrolamento primário possui 20 espiras, apresenta um valor máximo de fluxo de 21,3 μWb . Quando o enrolamento primário possui 40 espiras, o valor máximo do fluxo ligado é de, aproximadamente, 85,2 μWb , enquanto para as 60 espiras, o fluxo é de 195,9 μWb .

Deste modo, com o aumento das dimensões do núcleo do LCS, ocorre uma diminuição no valor máximo do fluxo ligado com o enrolamento primário independentemente do número de espiras eu constituem o enrolamento primário.



(a) **(b)**
Figura 4.9 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Com base na figura 4.10(a), quando o núcleo apresenta as dimensões originais o enrolamento primário possui 20 espiras, o fluxo ligado apresenta um valor máximo de 44,3 μWb , enquanto que para 40 espiras, o fluxo ligado com o primário apresenta um máximo de 177,9 μWb . Por fim, quando o enrolamento primário apresenta 60 espiras, o fluxo ligado é de, aproximadamente, 408 μWb .

A figura 4.9(b) mostra os resultados do valor do fluxo ligado com o enrolamento primário, quando se aumentam as dimensões do núcleo ferromagnético. É possível verificar que o valor do fluxo ligado com o enrolamento primário diminui ligeiramente quando as dimensões são superiores, confirmando que quando o enrolamento primário possui 20 espiras, apresenta um valor máximo de fluxo de 35,6 μWb . Quando este possui 40 espiras, o fluxo ligado atinge cerca de 142,5 μWb . Caso o enrolamento primário possua 60 espiras, o fluxo ligado para a distância máxima de 15 mm atingir 322,4 μWb .

Tal como se verificou para a situação anterior, ocorre uma diminuição no valor máximo do fluxo ligado com o enrolamento primário independentemente do número de espiras e constituem o enrolamento primário.

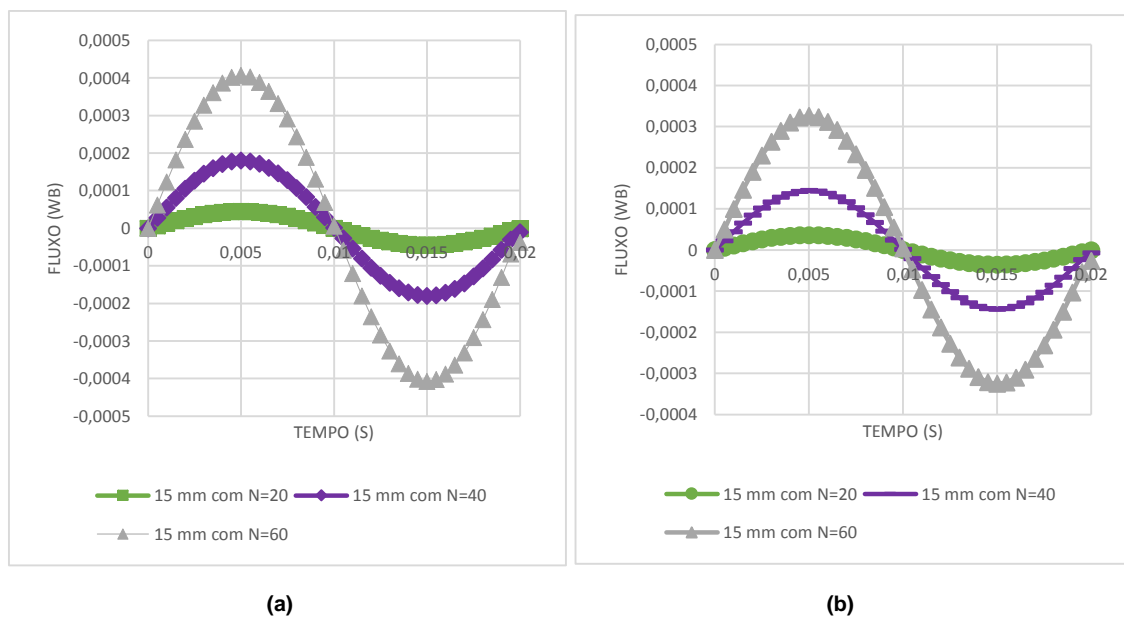


Figura 4.10 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Atendendo à distância entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário, é possível verificar através das figuras 4.9(a) e 4.10(a) que quanto maior a distância entre ambos, maior será o fluxo ligado com o enrolamento primário. Quanto ao número de espiras no enrolamento primário, pode-se afirmar que quanto maior o seu número, maior será o fluxo ligado.

Após a análise de ambas as situações, é possível observar que o aumento das dimensões do núcleo ferromagnético do LCS contribui para que o fluxo ligado diminua ligeiramente. Tal como foi explicado na secção anterior, o LCS não é idealmente invisível perante a rede, na medida em que há a existência de fluxo ligado com o enrolamento primário, o que leva ao aumento da queda de tensão aos terminais do LCS.

Na próxima etapa, são apresentados os resultados da simulação referente ao fluxo ligado com o enrolamento primário onde apenas se procedeu à alteração das dimensões do enrolamento primário consoante as informações da figura 4.1. Tal como foi realizado para os casos anteriores, utilizam-se as dimensões originais do núcleo do LCS e numa outra fase, aumentam-se cerca de quatro vezes.

A figura 4.11 apresenta os resultados referentes ao fluxo ligado com o enrolamento primário para os casos 1, 2 e 3, quando os enrolamentos se encontram distantes cerca de 0,1 mm. Com base nas figuras 4.11(a) e 4.11(b) é possível observar o fluxo ligado com o enrolamento primário do LCS em função do tempo, em regime de funcionamento normal quando o núcleo

apresenta as dimensões originais e quando este apresenta dimensões quatro vezes superiores, respetivamente.

Com base nos resultados obtidos com base no *software* Flux2D® é possível observar na figura 4.11(a) que sempre que os enrolamentos se encontram afastados cerca de 0,1 mm, o caso 3 apresenta um menor fluxo ligado com, aproximadamente, 15,9 μWb , seguidamente encontra-se o caso 2 com 18,3 μWb , de seguida tem-se o caso 1 com 22,4 μWb e por fim tem-se o enrolamento primário com as dimensões originais com 22,1 μWb . Comparativamente ao caso original em que o enrolamento primário possui as dimensões originais, é possível observar pela figura 4.9(a), que este constitui a geometria em que o valor máximo do fluxo ligado é superior em relação aos restantes três casos.

Com base na figura 4.8(b) é possível observar que o caso 3 apresenta um menor fluxo ligado com, aproximadamente, 13,1 μWb , seguidamente encontra-se o caso 2 com 15,9 μWb , depois tem-se o caso 1 com 17,4 μWb . Comparativamente ao caso original em que o enrolamento primário possui as dimensões originais, é possível observar pela figura 4.9(b), que este constitui a geometria em que o valor máximo do fluxo ligado é superior em relação aos restantes três casos.

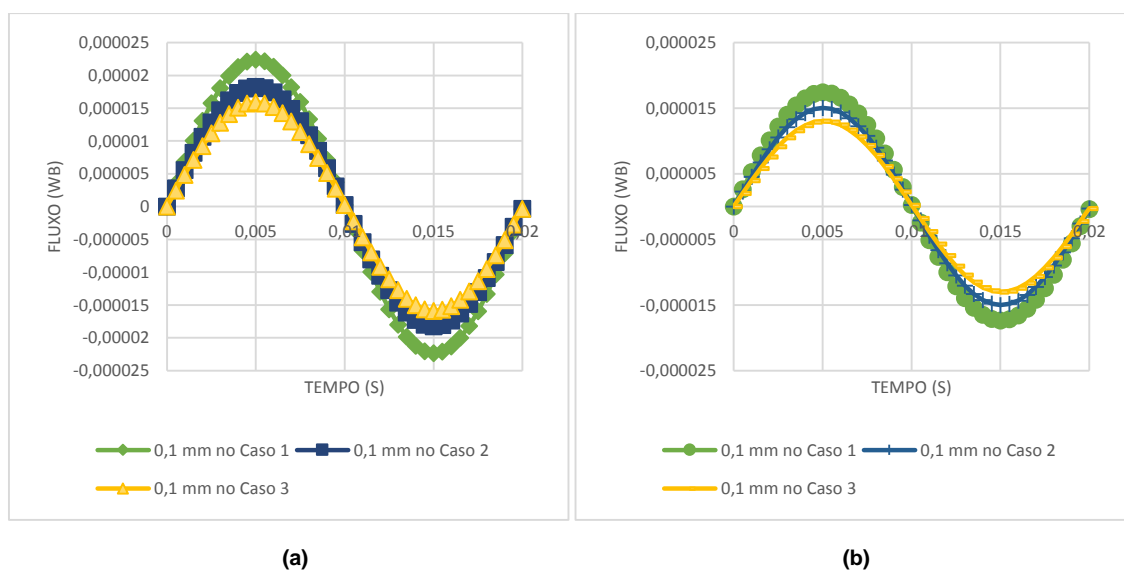
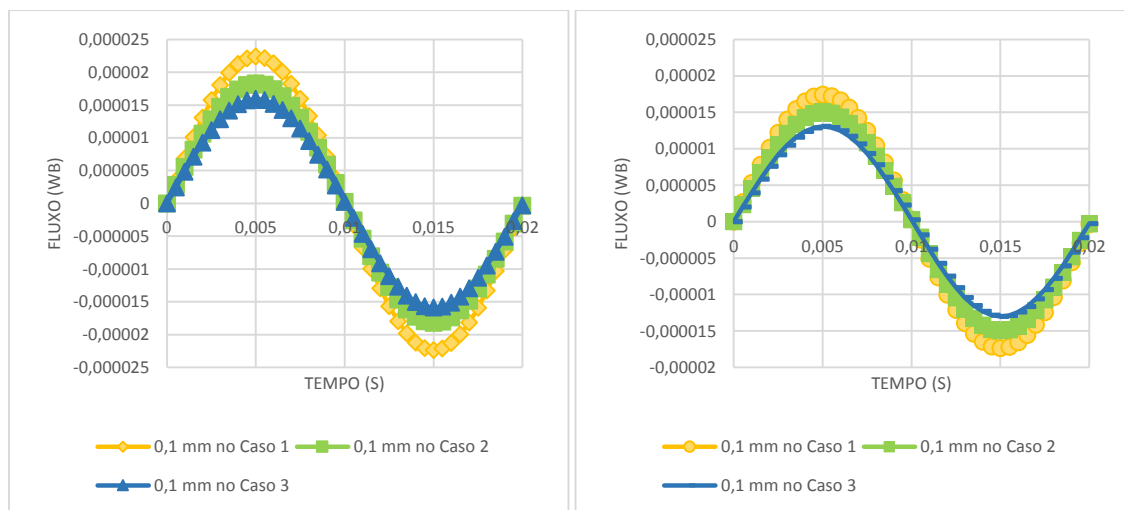


Figura 4.11 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Para uma distância de 15 mm entre enrolamentos em que o núcleo do LCS apresenta as dimensões originais, como se pode observar pela figura 4.12(a), a ordem das dimensões do enrolamento primário mantém-se a mesma para o caso anterior. Onde o caso 3 apresenta um menor valor de fluxo ligado com, aproximadamente, 15,1 μWb , o caso 2 apresenta um fluxo ligado bastante aproximando ao caso 3 com 18,1 μWb e o caso 1 apresenta um fluxo ligado de 22,4 μWb . Comparando o valor do fluxo ligado com a geometria original, na figura 4.10(a) é possível observar que o fluxo ligado é superior aos três casos estudados.

Com base na figura 4.12(b), onde o núcleo possui as dimensões superiores, verifica-se que o caso 3 apresenta um maior fluxo ligado de 12,9 μWb , o caso 2 apresenta um fluxo ligado bastante aproximando ao caso 3 com 15,1 μWb e o caso 1 com 17,4 μWb . Por fim, comparando o fluxo ligado com as dimensões originais e os três casos estudados, confirma-se que o caso original apresenta um fluxo superior aos restantes casos, tal como evidencia a figura 4.10.



(a) (b)
Figura 4.12 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Atendendo aos resultados obtidos é possível observar que o LCS não é idealmente invisível perante a rede, na medida em que, existe queda de tensão aos terminais do LCS, levando à existência de fluxo ligado com o enrolamento primário. Neste sentido e em ambas as situações, é possível observar que o aumento do núcleo ferromagnético do LCS contribui para que o fluxo ligado com o enrolamento primário diminua superficialmente. As simulações referentes à geometria original do enrolamento primário apresentam, em todos os casos, um valor superior em comparação com os três casos estudados.

Quanto à distância que separa os enrolamentos, é possível notar que quanto menor a distância entre os enrolamentos, menor será o fluxo ligado com o enrolamento primário.

4.1.4 Densidade de Fluxo Magnético

As figuras 4.13 e 4.14 ilustram os gráficos referentes aos valores da densidade de fluxo magnético ao traçar a componente normal junto ao material supercondutor em ambiente de simulação com o intuito de estudar o sentido paralelo das linhas de campo magnético e o valor da densidade de fluxo magnético em regime de funcionamento normal.

As figuras 4.13(a) e 4.13(b) mostram a densidade de fluxo magnético quando os enrolamentos encontram-se distantes cerca de 0,1 mm em que o núcleo ferromagnético do LCS apresenta as dimensões originais e quando este apresenta dimensões superiores, respetivamente. Como explicado no *Capítulo 3 – Descrição da Metodologia*, para que o valor da densidade de fluxo magnético se encontre entre $B = 0\text{ T}$ e $B = 4\text{ T}$, as linhas de campo magnético têm ser paralelas à superfície da fita SAT do LCS. Como tal, verifica-se este facto como se pode observar pelas figuras 4.13 no intervalo de $x = 0.001\text{ mm}$ e $x = 0.003\text{ mm}$ em qualquer uma das situações.

Baseando-se nas figuras 4.13(a) e 4.13(b), é possível observar uma pequena discrepância nos extremos dos gráficos, nomeadamente entre $x = 0\text{ m}$ e $x = 0.001\text{ m}$ e ainda no intervalo de $x = 0.003\text{ m}$ e $x = 0.004\text{ m}$ verificando-se que o aumento das dimensões do núcleo ferromagnético do LCS influencia o valor da densidade de fluxo magnético. Existe uma discrepância entre os resultados obtidos na figura 4.13, em que na figura 4.13(a) pode-se observar que no intervalo de $x = 0\text{ m}$ a $x = 0.004\text{ m}$ a densidade de fluxo magnético assume valores entre $B = 3.3\text{ mT}$ e $B = 13.9\text{ mT}$. Enquanto que para a figura 4.14(b) a densidade de fluxo magnético diminui ligeiramente, centrando-se no intervalo de $B = 3.6\text{ mT}$ e $B = 10.5\text{ mT}$.

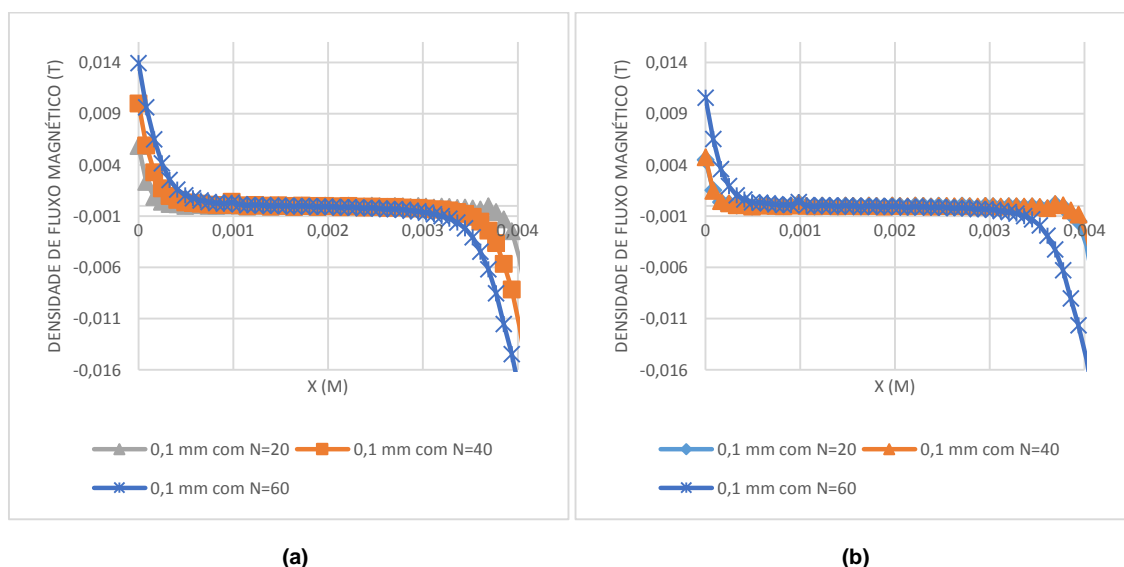
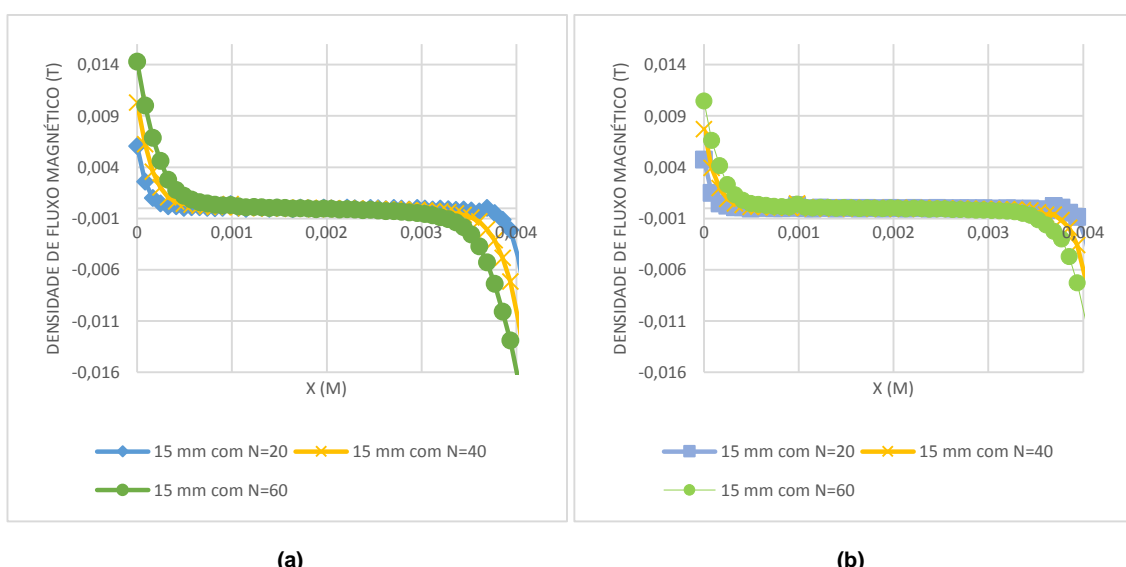


Figura 4.13 – Densidade de fluxo magnético com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

As figuras 4.14(a) e 4.14(b) mostram os resultados referentes à densidade de fluxo magnético quando o enrolamento secundário encontra-se a 15 mm de distância do enrolamento primário para duas situações distintas. Neste sentido, a figura 4.14(a) corresponde às dimensões originais do LCS e a figura 4.14(b) corresponde às simulações referentes a um núcleo ferromagnético superior.

Existe uma discrepância entre os resultados obtidos nas figuras 4.14(a) e 4.14(b), na medida em que no intervalo de $x = 0 \text{ m}$ a $x = 0.0005 \text{ m}$, a densidade de fluxo magnético assume valores entre $B = 4 \text{ mT}$ e $B = 14 \text{ mT}$. Enquanto que para a figura 4.14(b) a densidade de fluxo magnético diminui ligeiramente, centrando-se no intervalo de $B = 4.7 \text{ mT}$ e $B = 10 \text{ mT}$.

Neste sentido, é de notar que, o percurso favorável ao caminho das linhas de campo magnético centra-se no núcleo ferromagnético do LCS, em que estas evoluem paralelamente à secção da fita SAT, devido ao facto deste constituir o caminho com menor relutância para as linhas. Porém, caso a fita SAT se encontre no estado normal em que não apresenta propriedades supercondutoras ocorre blindagem magnética em que as linhas são muito fracas e em menor quantidade.



(a) (b)
Figura 4.14 - Densidade de fluxo magnético com T1 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Neste caso, a distância entre os enrolamentos, não mostra qualquer influência no valor da densidade de fluxo magnético.

A figura 4.15 refere-se à densidade de fluxo magnético referente aos casos 1, 2 e 3, de acordo com as informações contidas na figura 4.1, quando os enrolamentos se encontram a 0,1 mm de distância e em que o enrolamento primário apresenta 20 espiras. As figuras 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos quando o núcleo ferromagnético do LCS apresenta as dimensões originais e quando estas são cerca de quatro vezes superiores, respetivamente.

É possível observar uma discrepância nos resultados obtidos nas figuras 4.14(a) e 4.14(b), na medida em que no intervalo de $x = 0 \text{ m}$ a $x = 0.0005 \text{ m}$, as linhas de campo magnético assumem $B = 5.2 \text{ mT}$. Enquanto que para a figura 4.15(b) a densidade de fluxo magnético diminui ligeiramente, centrando-se em $B = 4.5 \text{ mT}$ para os três casos considerados. Verifica-se

que a geometria do enrolamento primário não provoca qualquer influência na densidade de fluxo magnético nem na evolução paralela das linhas de campo magnético na fita SAT.

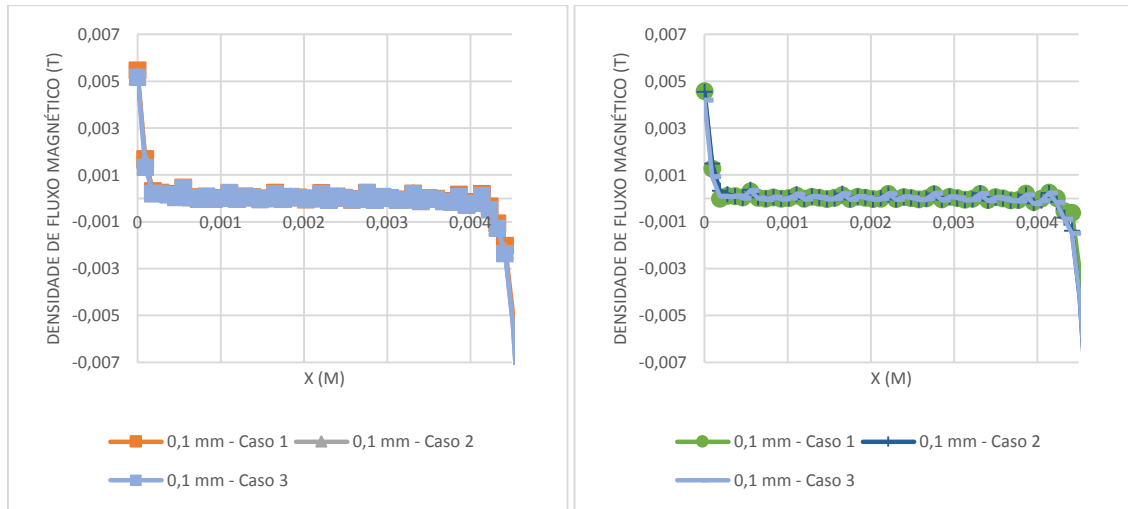
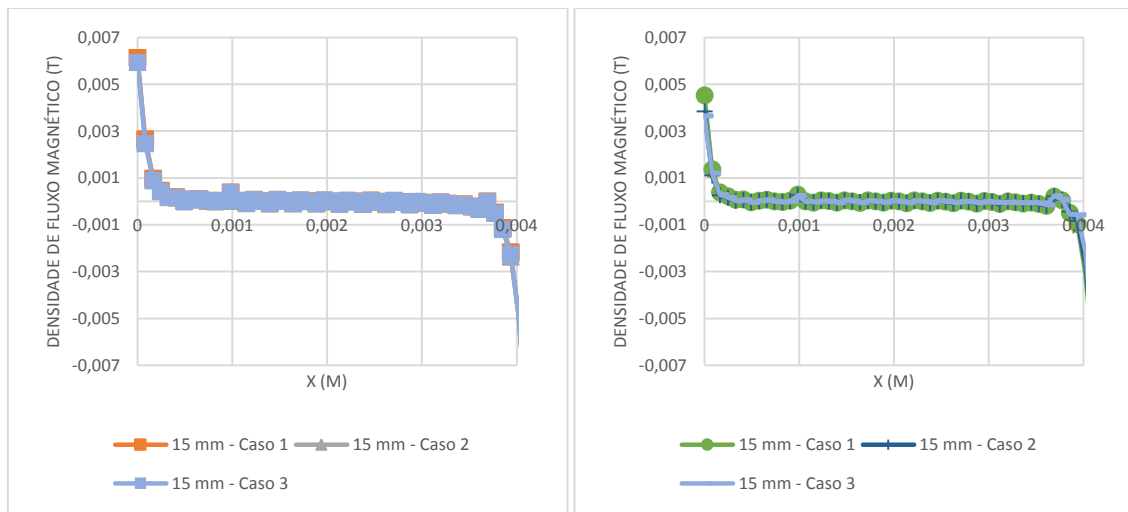


Figura 4.15 - Densidade de fluxo magnético com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam os resultados referentes a uma distância de 4.15 mm entre enrolamentos quando o núcleo ferromagnético do LCS apresenta as dimensões originais e quando estas são cerca de quatro vezes superiores, respetivamente. A figura 4.15 refere-se à densidade de fluxo magnético referente aos casos 1, 2 e 3, de acordo com as informações contidas na figura 4.1.

Tal como aconteceu para os resultados expressos na figura 4.15, neste caso pode-se observar, igualmente, uma discrepância nos resultados obtidos nas figuras 4.16(a) e 4.16(b), na medida em que no intervalo de $x = 0$ m a $x = 0.0005$ m, as linhas de campo magnético apresentam o valor de $B = 0.006$ T. Na figura 4.16(b) é possível observar que o valor da densidade de fluxo magnético diminui ligeiramente, assumindo $B = 4.2$ mT para os três casos. Neste sentido, a geometria do enrolamento primário não interfere na densidade de fluxo magnético nem na evolução paralela das linhas de campo magnético na fita SAT.



(a) (b)
Figura 4.16 - Densidade de fluxo magnético com T1 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Centrando-se na distância entre os enrolamentos, verifica-se que esta não influencia o percurso favorável ao caminho das linhas de campo magnético e que estas evoluem paralelamente à secção da fita SAT, devido ao facto deste constituir o caminho com menor relutância. Relativamente à geometria do enrolamento primário, este não constitui qualquer alteração aos resultados obtidos para os três casos estudados.

É possível ainda observar um aumento no valor da densidade de fluxo magnético quando $x = 0$ mm quando se trata de qualquer um dos três casos onde se altera a geometria do enrolamento primário.

4.2 Topologia 2

A segunda topologia simulada, a T2, encontra-se representada na figura 4.17 e encontra-se na referência (Pina, 2010). No *Apêndice 1 - Dimensões do Núcleo Ferromagnético com Topologia 1 e 2* encontram-se as dimensões reais (em mm) da T2. Neste sentido, procedeu-se à alteração da localização do enrolamento primário e secundário, mantendo as dimensões originais de todos os constituintes do LCS.

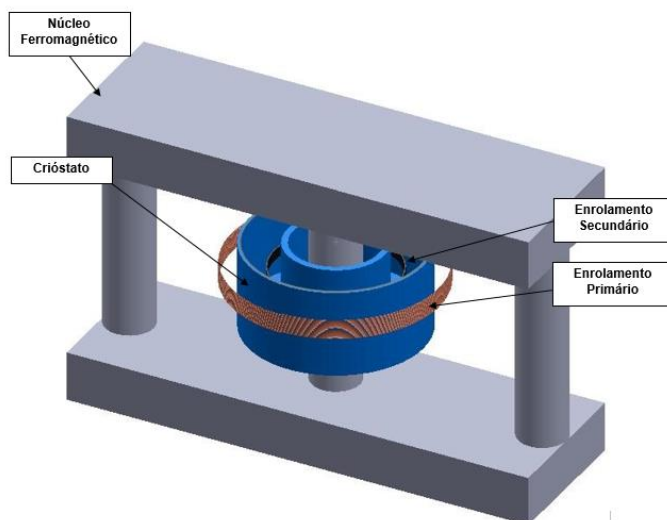


Figura 4.17 - LCS do tipo indutivo com Topologia 2.

Comparativamente ao LCS com a T1, o qual foi simulado anteriormente, a T2 apresenta uma disposição diferente em que a fita SAT encontra-se inserida no interior do enrolamento primário.

A presente secção refere-se à simulação e análise da T2 em regime de funcionamento normal, com base no estudo de diferentes parâmetros, tal como se realizou para a secção anterior. É de referir que as distâncias utilizadas entre o enrolamento primário e a fita SAT bem como as dimensões do núcleo foram as mesmas aquando da simulação da T1. Variou-se o número de espiras no enrolamento primário, para 20, 40 e 60 espiras e manteve-se as propriedades do circuito elétrico em que tensão máxima de alimentação é de 90 V, a impedância da linha é 1 Ω e da impedância da carga é 60 Ω .

De seguida serão apresentados os resultados das simulações referentes à T1, atendendo aos resultados da corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, fluxo ligado com o primário e a densidade de fluxo magnético.

4.2.1 Corrente no Enrolamento Secundário

As figuras 4.18 apresentam os resultados para a corrente no supercondutor obtido por simulação quando se afasta a fita SAT do enrolamento primário, cerca de 0,1 mm e 15 mm. Numa primeira fase, realizaram-se as simulações tendo em conta as dimensões originais do núcleo e numa fase posterior, aumentaram-se as suas dimensões cerca de quatro vezes.

Como se pode observar pela figura 4.18, quando o enrolamento primário é composto por 20 espiras, a amplitude máxima da corrente no enrolamento secundário é, aproximadamente, 28,3 A, quando este possui 40 espiras, a corrente máxima é de 58,8 A e no caso das 60 espiras, o valor máximo é de 87,6 A. É notório observar que quanto menor o número de espiras, menor será a corrente no enrolamento secundário. A expressão (3.2) discutida no *Capítulo 3 – Descrição da Metodologia*, verifica que quanto maior o número de espiras no enrolamento primário, maior será a corrente no enrolamento secundário, e vice-versa.

Por outro lado, realizaram-se novas simulações para o mesmo caso, em que apenas se aumentaram as dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, de modo a verificar a sua influência na corrente no enrolamento secundário. Os resultados demonstraram-se bastante aproximados aos resultados obtidos para a figura 4.18 e desta forma não se verificou oportuno representá-los.

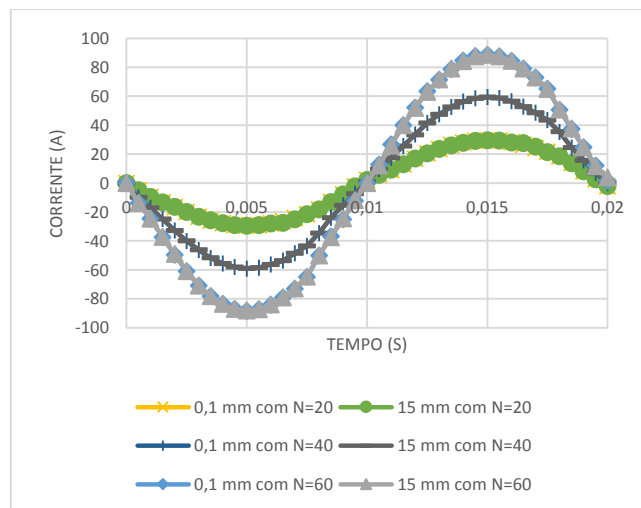


Figura 4.18 - Corrente no enrolamento secundário com T2.

Com base nas distâncias mínima e máxima definidas para os enrolamentos, pode-se observar que não apresentam nenhuma influência nos valores máximos da corrente que atravessa o enrolamento secundário.

Neste sentido, são apresentados os resultados da simulação referente à corrente do enrolamento secundário onde apenas se procedeu à alteração das dimensões do enrolamento

primário, não interferindo nos restantes constituintes do LCS. A figura 4.19 refere-se à corrente no enrolamento primário obtida para os casos 1, 2 e 3, consoante as informações expressas na figura 4.1, quando os enrolamentos se encontram a 0,1 mm e 15 mm de distância um do outro.

A figura 4.19 indica a corrente no enrolamento secundário, quando este se encontra a uma distância de 0,1 mm e 15 mm do enrolamento primário e quando o núcleo apresenta as dimensões originais. É possível verificar que o valor da amplitude máxima da corrente é de, aproximadamente, 29 A para todos os casos ilustrados na figura 4.19. Desta forma, é perceptível que a distância entre os enrolamentos e a sua geometria são parâmetros que pouco influenciam qualquer um dos casos.

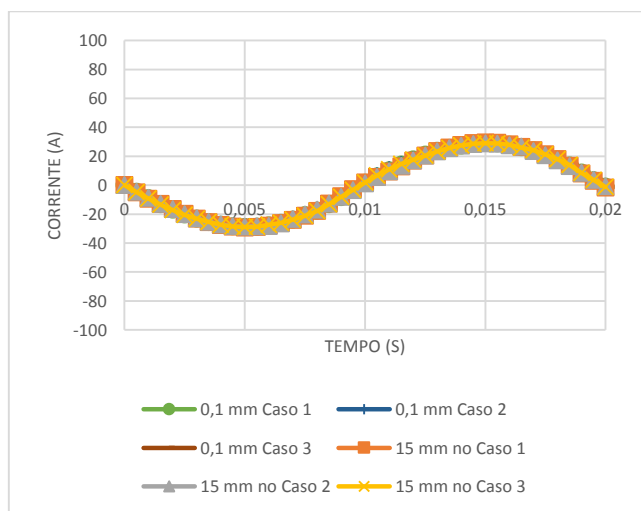


Figura 4.19 – Corrente no enrolamento secundário com T2 para os casos 1, 2 e 3.

É possível observar que independentemente da distância que separa o enrolamento primário do enrolamento secundário, bem como a geometria do enrolamento primário em ambiente de simulação, não ocorre variações no valor máximo da corrente no enrolamento secundário. Porém, o número de espiras do enrolamento primário torna-se no fator que poderá interferir no valor da amplitude máxima da corrente no enrolamento primário.

Realizando um paralelo entre os resultados das figuras 4.18 e 4.19, verifica-se que ocorre um aumento na corrente máxima no enrolamento secundário.

4.2.2 Queda de Tensão aos Terminais do LCS

Neste caso, realizou-se o mesmo método utilizado anteriormente em que se efetuaram simulações quando o núcleo do LCS apresenta as dimensões originais e quando apresenta dimensões superiores.

Com base na figura 4.20(a) pode-se observar a queda de tensão aos terminais do LCS quando os enrolamentos se encontram à distância mínima de 0,1 mm e quando o núcleo apresenta dimensões distintas. Focando-se na figura 4.20(a), quando o enrolamento primário possui 20 espiras, a queda de tensão é de, aproximadamente, -4,5 mV. Com o aumento no número de espiras para 40, ocorre um aumento na queda de tensão, assumindo -19,1 mV. Com o aumento no número de espiras no enrolamento primário, a queda de tensão é de, aproximadamente, -58,6mV.

Considerando um núcleo com dimensões cerca de quatro vezes superiores, a queda de tensão aos terminais do LCS é de -5,2 mV quando o enrolamento primário possui 20 espiras, tal como ilustra a figura 4.20(b). Quando este apresenta 40 espiras, tem-se cerca de -21,3 mV quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. Para 60 espiras, a queda de tensão é, aproximadamente, -48,9 mV.

Evidenciando os valores mínimos da queda de tensão aos terminais do LCS representados nas figuras 4.20(a) e 4.20(b), é possível observar que corresponde a cerca de 0,005% e 0,006% da tensão máxima de alimentação da fonte, respetivamente.

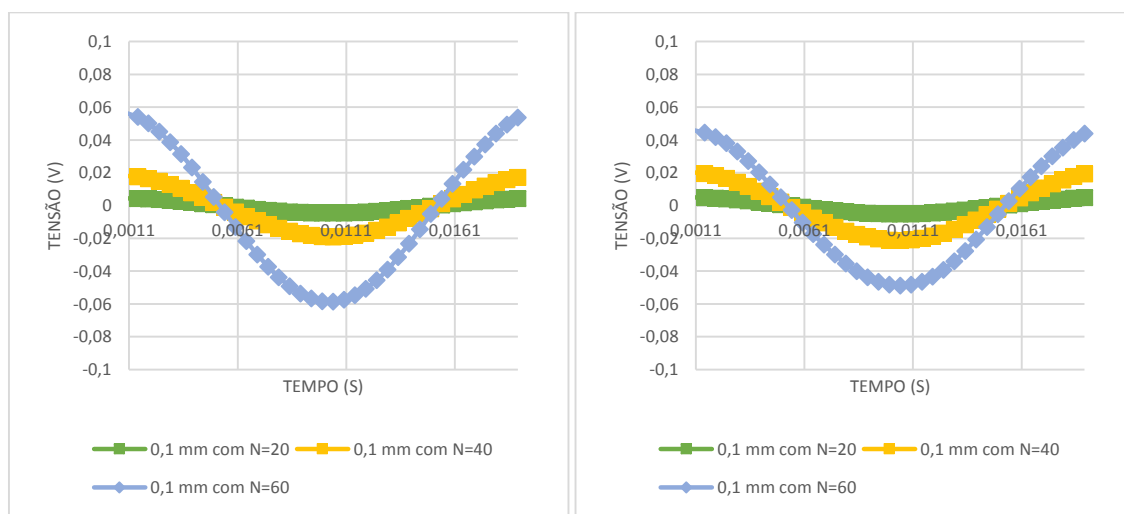


Figura 4.20 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Quando os enrolamentos se encontram distantes cerca de 15 mm, com base na figura 4.21, pode-se observar que o valor da queda de tensão quando o enrolamento primário possui 20 espiras é de, aproximadamente, -14,6 mV. Com o aumento no número de espiras para 40, ocorre um aumento na queda de tensão assumindo -43,5 mV. Para as 60 espiras no enrolamento primário, a queda de tensão é de, aproximadamente, -133,2 mV.

Atendendo à figura 4.21(b), considerando um núcleo com dimensões cerca de quatro vezes superiores, a queda de tensão aos terminais do LCS é de -15,6 mV, quando o enrolamento

primário possui 20 espiras. Quando possui 40 espiras, tem-se cerca de -62,8 mV quando atingem a distância máxima. Para as 60 espiras, o valor da queda de tensão é de, aproximadamente, -103 mV para a distância máxima de 15 mm.

Atendendo aos valores mínimos da queda de tensão aos terminais do LCS representados nas figuras 4.21(a) e 4.21(b), é possível observar que corresponde a cerca de 0,016% e 0,017% da tensão máxima de alimentação da fonte, respectivamente.

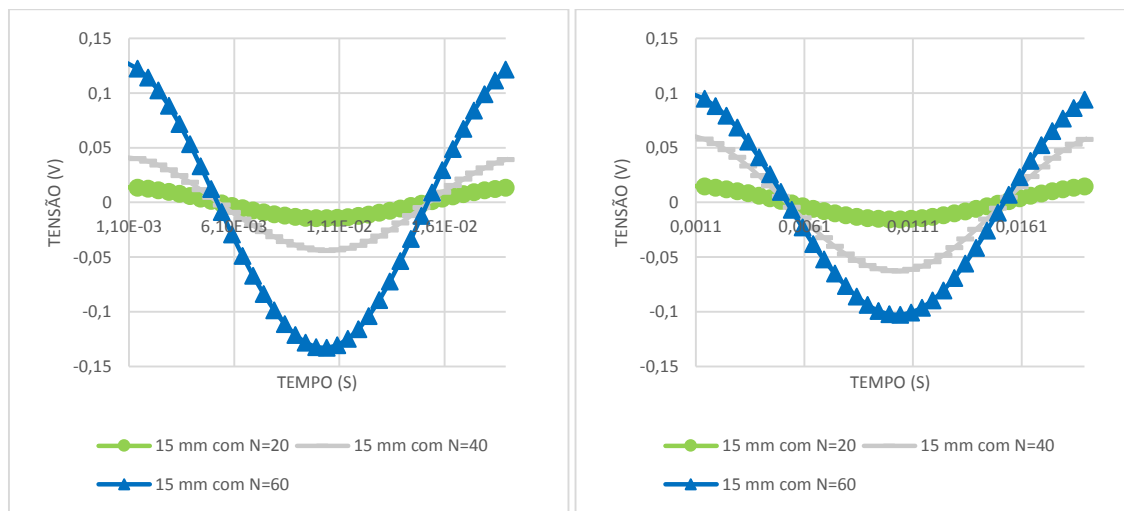


Figura 4.21 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Comparando as duas situações anteriores, pode-se observar que a utilização de núcleo ferromagnético com dimensões superiores favorece a diminuição da queda de tensão aos terminais do LCS quando o enrolamento primário possui 20 e 40 espiras, independentemente das distâncias que separam os enrolamentos.

A figura 4.22 apresenta os resultados da simulação para a queda de tensão aos terminais do LCS quando o enrolamento primário apresenta três tipos de geometrias diferentes apresentadas na figura 4.1. Neste caso, realizaram-se dois tipos de simulações, em que na primeira não se alteraram as dimensões do núcleo do LCS e numa segunda fase, aumentaram-se as suas dimensões cerca de quatro vezes mantendo sempre 20 espiras no enrolamento primário.

As figuras 4.22(a) e 4.22(b) referem-se às simulações realizadas para a queda de tensão aos terminais do LCS em que os enrolamentos se encontram afastados cerca de 0,1 mm em que o núcleo possui as dimensões originais e quando se as aumenta, respetivamente. Com base nas informações da figura 4.22(a) é possível observar que a queda de tensão aos terminais do LCS é mínima para o caso 2, atingindo cerca de -4,5 mV, seguidamente o valor da queda de tensão

aumenta quando se trata do caso 3 com -4,8 mV, da mesma forma, este aumenta no caso 1 com -5,4 mV.

De uma forma comparativa, o caso original ilustrado na figura 4.20(a) apresenta um valor máximo de -4,7 mV para a queda de tensão quando os enrolamentos se encontram à distância mínima, não havendo discrepâncias plausíveis. Não se verifica uma diferença acentuada na variação na queda de tensão entre os três casos, onde o caso 2 apresenta o menor valor na queda de tensão.

A figura 4.22(b) apresenta os resultados da queda de tensão aos terminais do LCS quando este apresenta um núcleo quatro vezes superior. De um modo geral, é possível observar que a queda de tensão no caso 2 apresenta menor valor com, aproximadamente, -4,2 mV, de seguida tem-se o caso 3 com -4,4 mV e para o caso 1, a queda de tensão é -4,8 mV. É possível observar que quando se trata da geometria original do enrolamento primário, a queda de tensão diminui, assumindo o valor de -4,7 mV, como se poder observar pela figura 4.20(b).

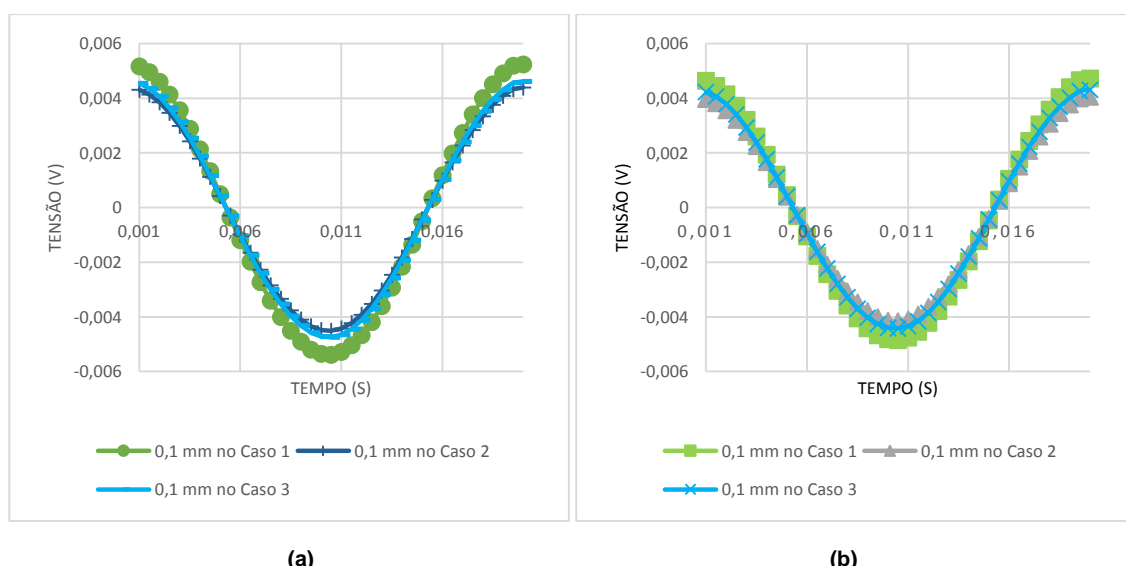


Figura 4.22 – Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Seguidamente a figura 4.23 apresenta os resultados referentes a queda de tensão aos terminais do LCS para uma distância máxima de 15 mm entre os enrolamentos. Com base na figura 4.23(a) em que o núcleo do LCS apresenta as dimensões originais e os enrolamentos encontram-se à distância máxima de 15 mm, o caso 1 apresenta o menor valor de queda de tensão, sendo este de -6,4 μ V, com um valor superior, tem-se o caso 2 com cerca de -6,9 μ V e por fim surge o caso 3, com -7,3 μ V. Mais uma vez, a queda de tensão aos terminais do LCS é superior, com cerca de -22,5 mV, quando se trata da geometria original do enrolamento primário, tal como mostra a figura 4.20.

Quando o enrolamento primário e o secundário se encontram afastados 15 mm, com base na figura 4.23(b), é possível verificar que o valor mínima da tensão é de $-6,7 \mu\text{V}$ para o caso 1, seguidamente para o caso 2, a queda de tensão aumenta para $-7,2 \mu\text{V}$ e por fim, para o caso 3, a amplitude máxima na tensão é de $-7,6 \mu\text{V}$. De uma forma comparativa e com base na figura 4.21, o caso original obtém um valor $-14,6 \text{ mV}$ quando os enrolamentos se encontram à distância máxima de 15 mm. Neste sentido, o caso 1 seria o tipo de geometria do enrolamento primário mais vantajosa, visto que apresenta menor queda de tensão aos terminais do LCS, permitindo maior “invisibilidade” por parte do LCS perante a rede elétrica.

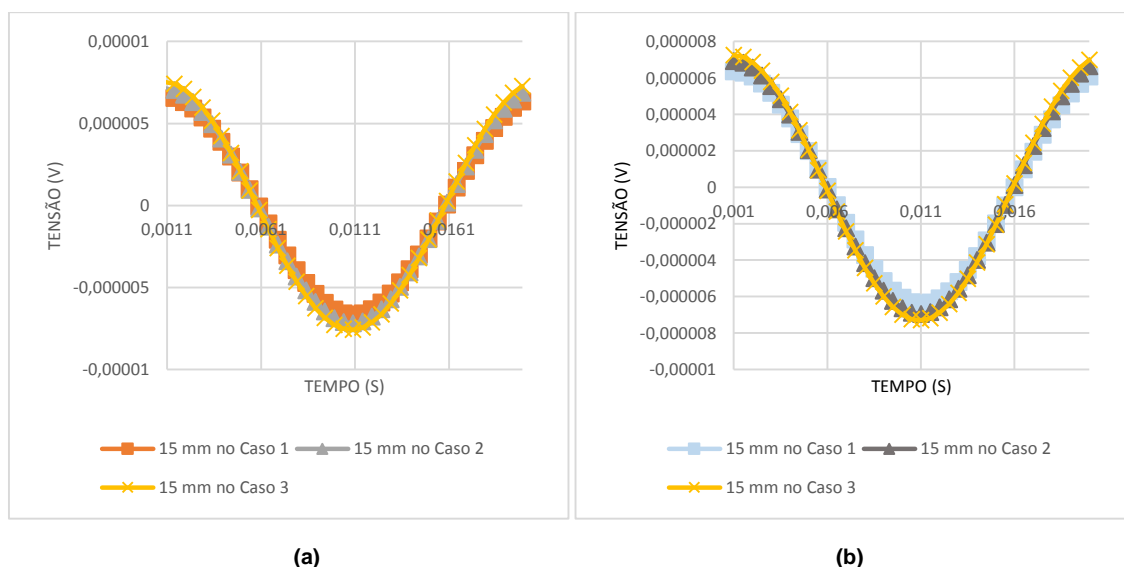


Figura 4.23 - Queda de tensão aos terminais do LCS com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Após as simulações realizadas, de um modo geral é possível observar que quanto menor a distância entre o enrolamentos, menor será a queda de tensão aos terminais do LCS, consoante as três geometrias utilizadas para definir o enrolamento primário em ambiente de simulação. Com base nas dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, existem algumas discrepâncias, onde o aumento das dimensões do núcleo proporciona menor queda de tensão aos terminais do LCS.

Com base na análise realizada, é possível verificar que existe menor queda de tensão quando os enrolamentos se encontram a uma distância mínima de 0,1 mm comparativamente à distância máxima entre ambos. Evidenciando o número de espiras no enrolamento primário e tal como aconteceu para a T1, quanto menor for o número de espiras no enrolamento primário, menor será a queda de tensão aos terminais do LCS, fazendo com que este não se torne idealmente invisível perante a rede.

4.2.3 Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário

De modo a estudar o fluxo ligado com o enrolamento primário consoante a influência no número de espiras no enrolamento primário e de acordo com a distância que separa este do enrolamento secundário, obteve-se os resultados como se pode observar pelas figuras 4.24 e 4.25.

Com base na figura 4.24(a) quando o núcleo do LCS apresenta as dimensões originais em que o enrolamento primário possui 20 espiras a uma distância mínima de 0,1 mm do enrolamento secundário, o fluxo ligado é, aproximadamente, 8,35 μWb . Quando o enrolamento primário possui 40 espiras, o fluxo ligado continua a aumentar e apresenta cerca de 33,8 μWb para a distância mínima, enquanto que para 60 espiras, o fluxo ligado é de, aproximadamente, 100 μWb . É possível observar que quanto menor o número de espiras que compõem o enrolamento primário, menor será o fluxo ligado.

Com base nas possíveis influências nas dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, realizaram-se simulações aumentando as suas dimensões cerca de quatro vezes, e estudou-se a influência do fluxo ligado com o primário, tal como mostra a figura 4.24(b). É possível observar que acontece exatamente o mesmo que para o caso anterior. Deste modo, quando o enrolamento primário apresenta 20 espiras, o valor máximo do fluxo ligado é de, aproximadamente, 7,4 μWb . Quando o enrolamento primário possui 40 espiras, o fluxo é 30,3 μWb e aumentando o número de espiras para 60, o fluxo ligado é cerca de 70 μWb quando a distância entre os enrolamentos é mínima.

Deste modo, com o aumento das dimensões do núcleo do LCS, ocorre uma diminuição no valor máximo do fluxo ligado com o enrolamento primário independentemente do número de espiras eu constituem o enrolamento primário.

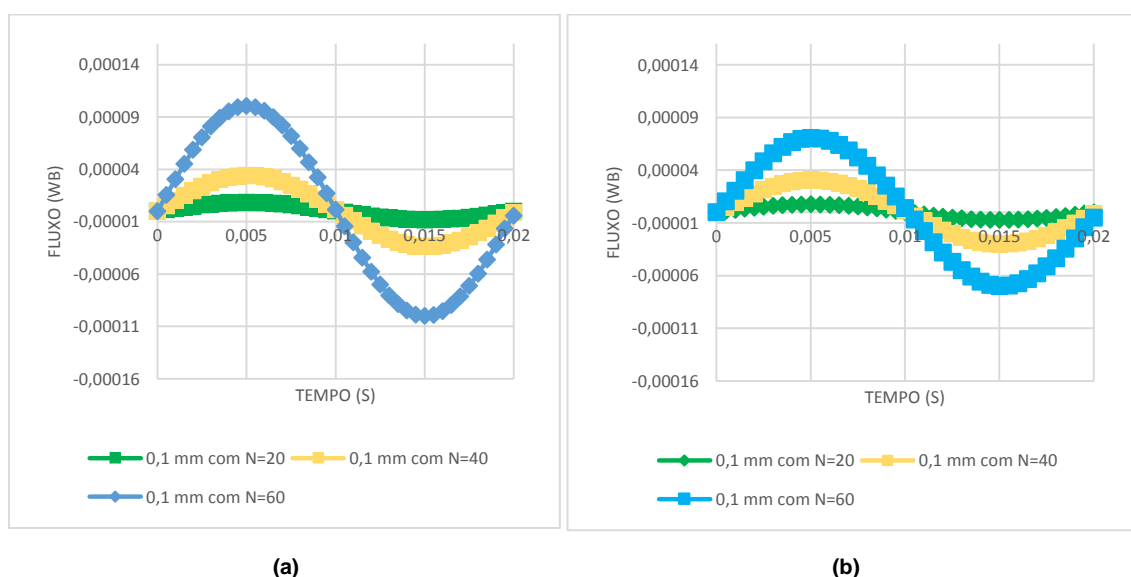


Figura 4.24 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Centrando-se na distância máxima de 15 mm entre os enrolamentos, estudou-se o fluxo ligado com o enrolamento primário e observando a figura 4.25(a) quando o enrolamento primário possui 20 espiras, o valor máximo do fluxo ligado é, aproximadamente, é 24,9 μWb . Quando o enrolamento primário possui 40 espiras, o fluxo ligado continua a aumentar e assume 78,5 μWb . Com o aumento no número de espiras para 60, o fluxo ligado é de, aproximadamente, é 227 μWb . Tal como se sucedeu para o caso anterior, verifica-se que quanto menor o número de espiras no enrolamento primário, menor será o fluxo ligado.

Com base nas possíveis influências nas dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, realizaram-se simulações aumentando as suas dimensões cerca de quatro vezes, e estudou-se a influência do fluxo ligado com o primário, tal como mostra a figura 4.24(b). É possível observar que acontece exatamente o mesmo tal como para o caso anterior. Quando o enrolamento primário apresenta 20 espiras, o valor máximo do fluxo ligado assume cerca de 23,2 μWb . Aumentando o número de espiras para 40 espiras, o fluxo ligado é, aproximadamente, 92,7 μWb . Para 60 espiras, o fluxo ligado é cerca de 213 μWb quando a distância é 15 mm.

Tal como aconteceu para o caso anterior, existe uma discrepância quando se aumentam as dimensões do núcleo ferromagnético, verificando-se a ocorrência de uma diminuição no valor do fluxo ligado com o enrolamento primário.

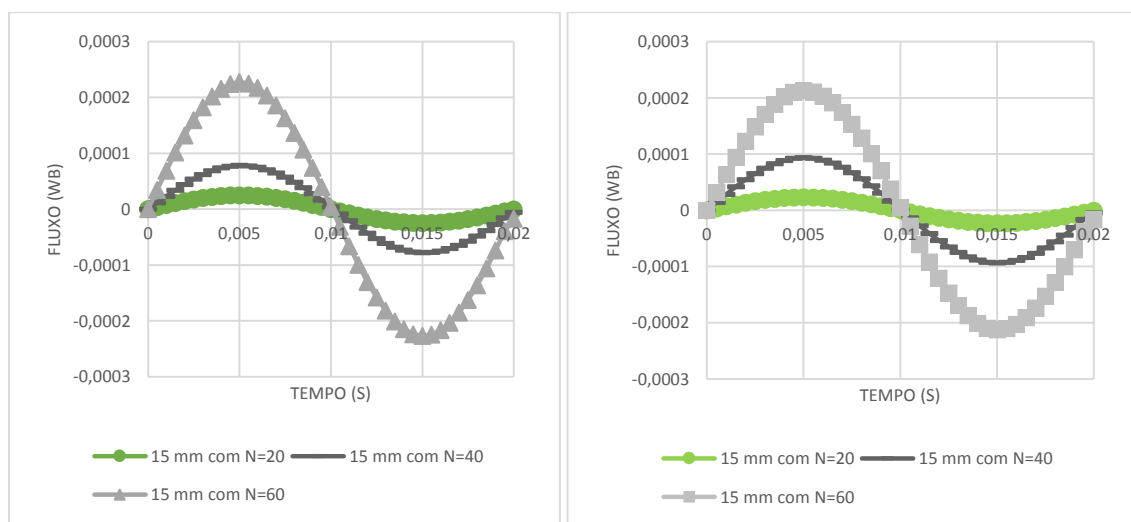


Figura 4.25 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Ao verificar os resultados obtidos para os dois casos, em que o núcleo apresenta as dimensões originais e noutra fase quando apresenta dimensões superiores, pode-se observar que ocorre uma diminuição no valor do fluxo ligado quando este apresenta dimensões superiores.

Tanto numa situação como na outra, o fluxo ligado apresenta valores mínimos quando o enrolamento primário possui 20 espiras e atendendo à distância entre os enrolamentos, é possível notar que quanto menor a distância entre ambos, menor será o fluxo ligado com o enrolamento primário.

De seguida são apresentados os resultados da simulação referente ao fluxo ligado com o enrolamento primário onde apenas se procedeu à alteração das dimensões deste, não interferindo nos restantes constituintes do LCS. A figura 4.25 refere-se ao fluxo ligado com o enrolamento primário obtido para os casos 1, 2 e 3, consoante as informações presentes na figura 4.1, quando os enrolamentos se encontram distantes cerca de 0,1 mm.

Com base na figura 4.25(a) é possível observar o fluxo ligado com o enrolamento primário do LCS onde em que os enrolamentos encontram-se afastados cerca de 0,1 mm. Verifica-se que o caso 2 apresenta um menor fluxo ligado com, aproximadamente, 7,2 μWb , seguidamente encontra-se o caso 3 com 7,6 μWb , depois tem-se o caso 1 com 8,6 μWb .

Com base na figura 4.25(b) é possível observar o fluxo ligado com o primário quando o núcleo do LCS apresenta dimensões cerca de quatro vezes superiores. Quando os enrolamentos se encontram à distancia mínima, é possível verificar que o caso 1 apresenta um fluxo mais elevado, na ordem dos, 7,8 μWb , de seguida apresenta-se o caso 3 com 7 μWb e por fim, o caso 2 apresenta o menor valor de fluxo ligado com o primário, sendo este de 6,6 μWb .

Centrando-se na influência das dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, é possível observar que ocorre uma diminuição no valor máximo do fluxo ligado com o enrolamento primário quando se aumentam as dimensões do núcleo.

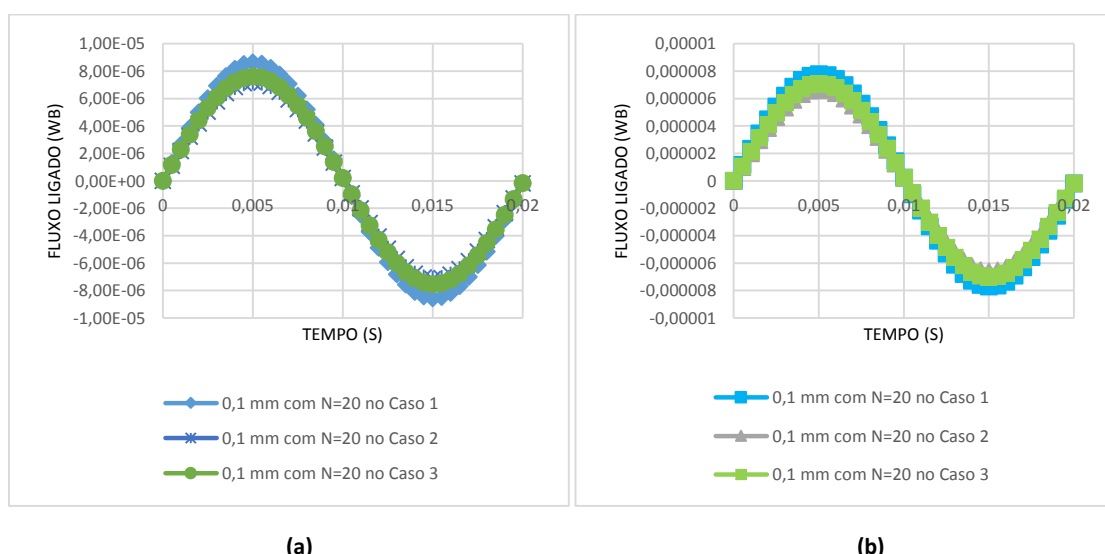


Figura 4.26 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Quando ambos se encontram afastados cerca de 15 mm em que o núcleo apresenta as dimensões originais, como mostra a figura 4.26(a), o caso 1 apresenta um menor valor de fluxo ligado com 9,7 η Wb, de seguida ocorre um ligeiro aumento para 10,6 η Wb tratando-se do caso 2 e por fim, tem-se o caso 3 com, aproximadamente, 11,2 η Wb.

Centrando-se na figura 4.26(b) o de se procedeu ao aumento das dimensões do núcleo ferromagnético, tem-se que o caso 1 apresenta um fluxo ligado máximo 11,2 η Wb, de seguida tem-se o caso 2 com 10,5 η Wb e por fim o caso 1 com 9,6 η Wb. Tal como sucedeu para o caso anterior, quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm, o fluxo ligado com o primário diminui drasticamente.

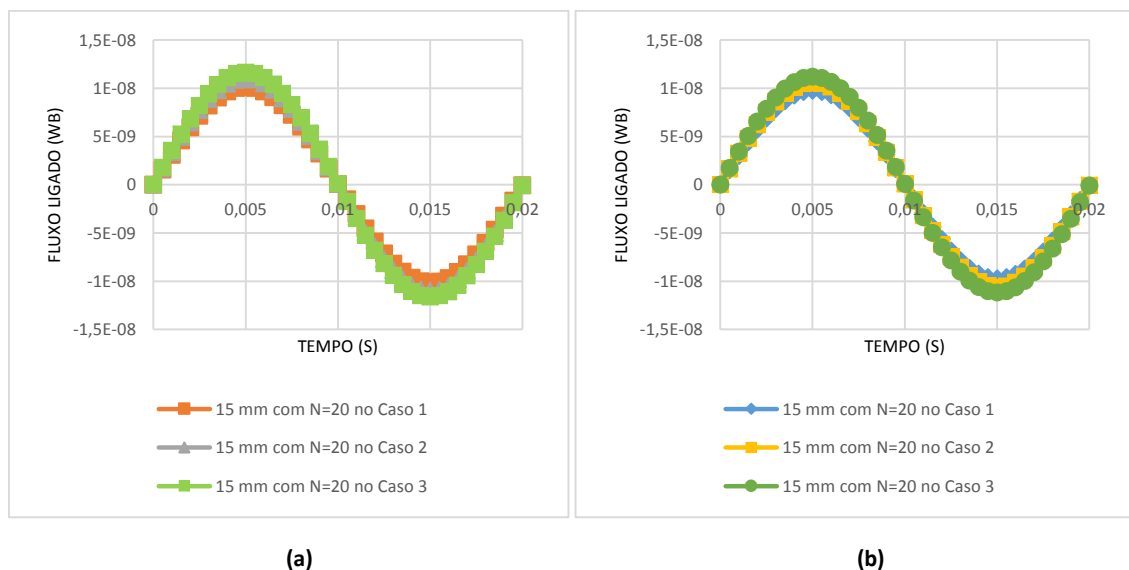


Figura 4.27 - Fluxo ligado com o enrolamento primário com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Ao realizar um paralelo entre o valor do fluxo ligado com o primário de acordo com as distâncias mínima e máxima entre os enrolamentos, é possível observar que quando ambos se encontram a 15 mm de distância. Neste sentido, quanto maior a distância entre os enrolamentos, menor será o valor do fluxo ligado com o enrolamento primário.

É possível observar que quanto maior forem as dimensões do núcleo, maior será o valor do fluxo ligado com o primário gerando uma queda de tensão aos terminais do LCS.

Com base na geometria do enrolamento primário, é possível verificar que qualquer um dos três casos estudados favorece a diminuição do fluxo ligado com o enrolamento primário, contrariamente ao caso original.

4.2.4 Densidade de Fluxo Magnético

As figuras 4.28 e 4.29 ilustram os gráficos referentes aos valores da densidade de fluxo magnético ao traçar a componente normal junto ao material supercondutor em ambiente de simulação. As figuras 4.28(a) e 4.28(b) mostram a densidade de fluxo magnético quando os enrolamentos encontram-se distantes cerca de 0,1 mm em que o núcleo ferromagnético do LCS apresenta as dimensões originais e quando este apresenta dimensões superiores, respetivamente.

Observando as figuras 4.28(a) e 4.28(b) é possível observar uma discrepância nos extremos dos gráficos, entre $x = 0$ m e $x = 0,001$ m e em $x = 0,0033$ m e $x = 0,004$ m, verifica-se que o aumento das dimensões do núcleo ferromagnético influencia o valor da densidade de fluxo magnético. Existe uma diferença entre os resultados obtidos na figura 4.28, em que na figura 4.13(a) pode-se observar que no intervalo de $x = 0$ m a $x = 0,004$ m a densidade de fluxo magnético assume valores entre $B = 5,27$ mT e $B = 13,5$ mT. Enquanto que para a figura 4.14(b) a densidade de fluxo magnético diminui ligeiramente, centrando-se no intervalo de $B = 4,4$ mT e $B = 12,8$ mT.

Como explicado no *Capítulo 3 – Descrição da Metodologia*, para que o valor da densidade de fluxo magnético se encontre entre $B = 0$ T e $B = 4$ T, as linhas de campo magnético têm de ser paralelas à superfície da fita SAT do LCS. Neste sentido, confirma-se este facto como se pode observar pelas figuras 4.28 no intervalo aproximado de $x = 0,001$ m e $x = 0,003$ m em qualquer uma das situações.

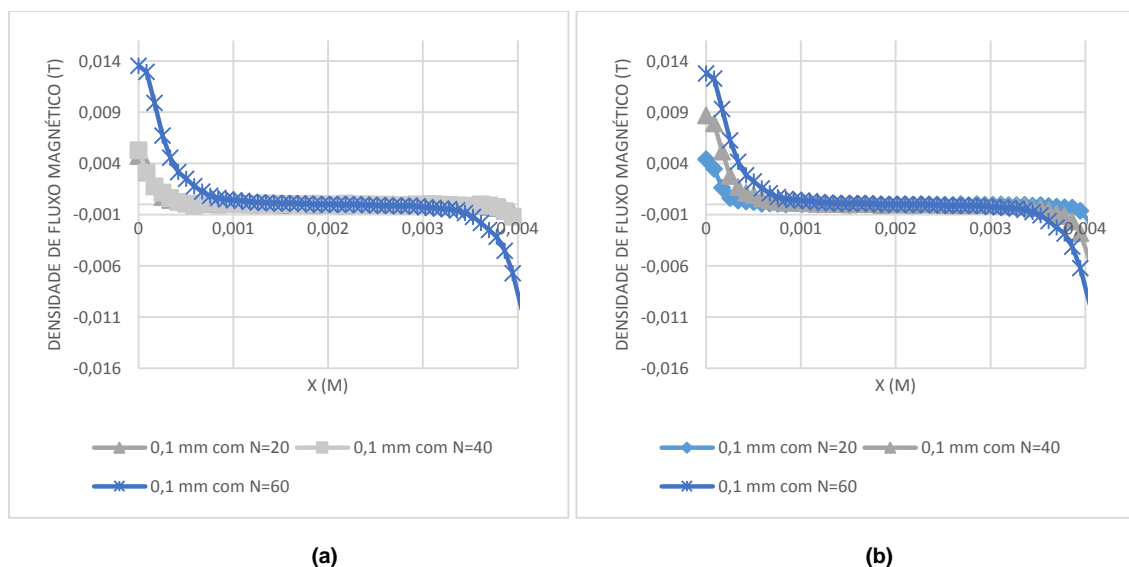


Figura 4.28 – Densidade de fluxo magnético com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

As figuras 4.29(a) e 4.29(b) apresentam os resultados referentes à densidade de fluxo magnético quando o enrolamento secundário encontra-se a 15 mm de distância do enrolamento primário em que a figura 4.14(a) corresponde às dimensões originais do LCS e a figura 4.14(b) corresponde às simulações referentes a um núcleo ferromagnético superior.

Existem diferenças entre os resultados obtidos nas figuras 4.29(a) e 4.29(b), visto que no intervalo de $x = 0$ m a $x = 0.001$ m, as linhas de campo magnético assumem valores entre $B = 7$ mT e $B = 17$ mT. Enquanto que para a figura 4.29(b) a densidade de fluxo magnético diminui ligeiramente, centrando-se no intervalo de $B = 6$ mT e $B = 16$ mT.

Verifica-se que o percurso favorável ao caminho das linhas de campo magnético centra-se no núcleo ferromagnético do LCS, em que estas evoluem paralelamente à secção da fita SAT, devido ao facto deste constituir o caminho com menor relutância para as linhas. Porém, caso a fita SAT se encontre no estado normal em que não apresenta propriedades supercondutoras ocorre blindagem magnética em que as linhas são muito fracas e em menor quantidade.

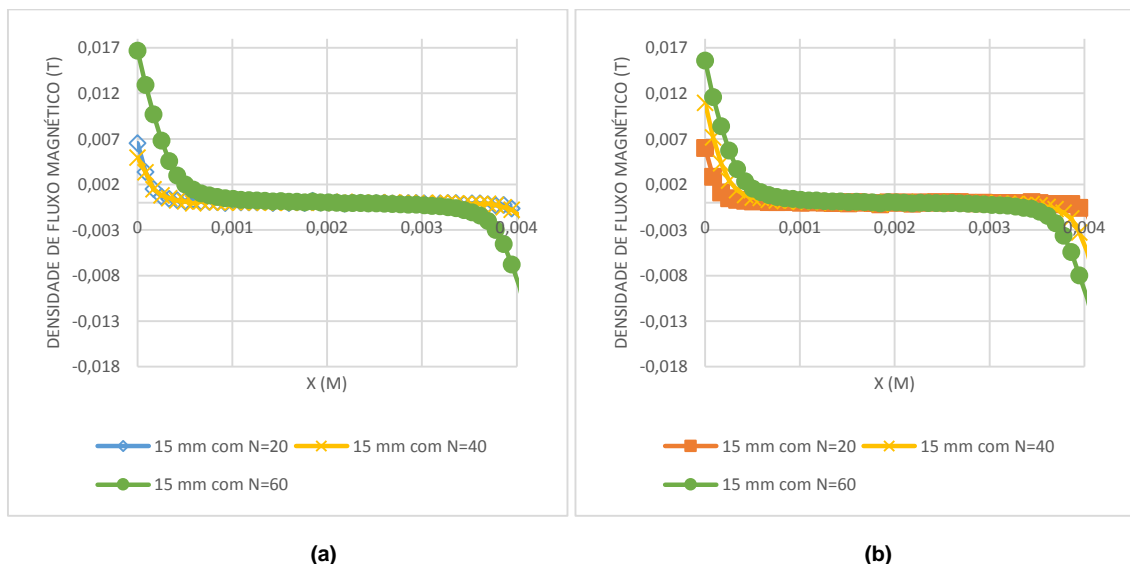


Figura 4.29 - Densidade de fluxo magnético com T2 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Comparando os resultados das figuras 4.28 e 4.29, é possível observar que a distância entre os enrolamentos, não mostra qualquer influência no valor da densidade de fluxo magnético.

As figuras 4.30 e 4.31 apresentam os resultados obtidos quando o núcleo ferromagnético do LCS apresenta as dimensões originais e quando estas são cerca de quatro vezes superiores, respetivamente. A figura 4.30 refere-se à densidade de fluxo magnético referente aos casos 1, 2 e 3, de acordo com as informações contidas na figura 4.1, quando os enrolamentos se encontram a 0,1 mm de distância e em que o enrolamento primário apresenta 20 espiras.

Tal, como aconteceu para os casos anteriores, verifica-se uma diferença nos resultados obtidos nas figuras 4.30(a) e 4.30(b), na medida em que no intervalo de $x = 0$ m a $x = 0.0005$ m, as linhas de campo magnético para os três casos centram-se no 5 mT. Enquanto que para a figura 4.15(b) a densidade de fluxo magnético mantém-se no mesmo valor para os três casos considerados. Verifica-se então que a geometria do enrolamento primário não provoca influência na densidade de fluxo magnético nem na evolução paralela das linhas de campo magnético na fita SAT.

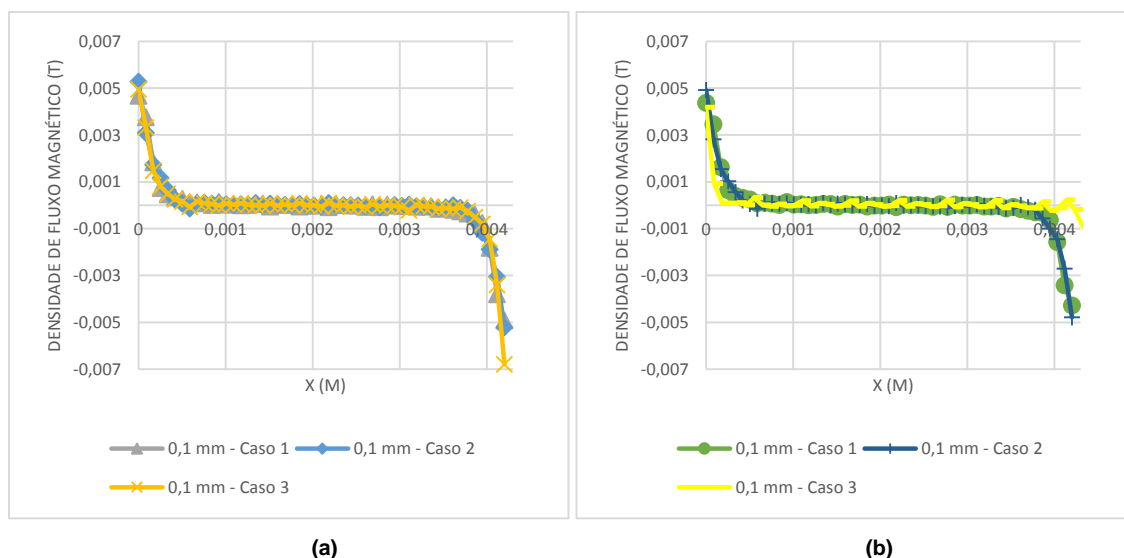


Figura 4.30 – Densidade de fluxo magnético com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 0,1 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

A figura 4.31 refere-se à densidade de fluxo magnético referente aos casos 1, 2 e 3, de acordo com as informações contidas na figura 4.1, quando os enrolamentos se encontram a 15 mm de distância e em que o enrolamento primário apresenta 20 espiras. As figuras 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos quando o núcleo ferromagnético do LCS apresenta as dimensões originais e quando estas são cerca de quatro vezes superiores, respetivamente.

Tal como aconteceu para os resultados expressos na figura 4.15, neste caso pode-se observar, igualmente, uma discrepância nos resultados obtidos nas figuras 4.16(a) e 4.16(b), na medida em que no intervalo de $x = 0$ m a $x = 0.0005$ m, a densidade de fluxo magnético apresenta, aproximadamente, 6,6 mT.

Na figura 4.16(b) é possível observar que o valor da densidade de fluxo magnético diminui ligeiramente, assumindo o valor de 6,3 mT para os três casos. Neste sentido, a geometria do enrolamento primário não interfere na densidade de fluxo magnético nem na evolução paralela das linhas de campo magnético na fita SAT.

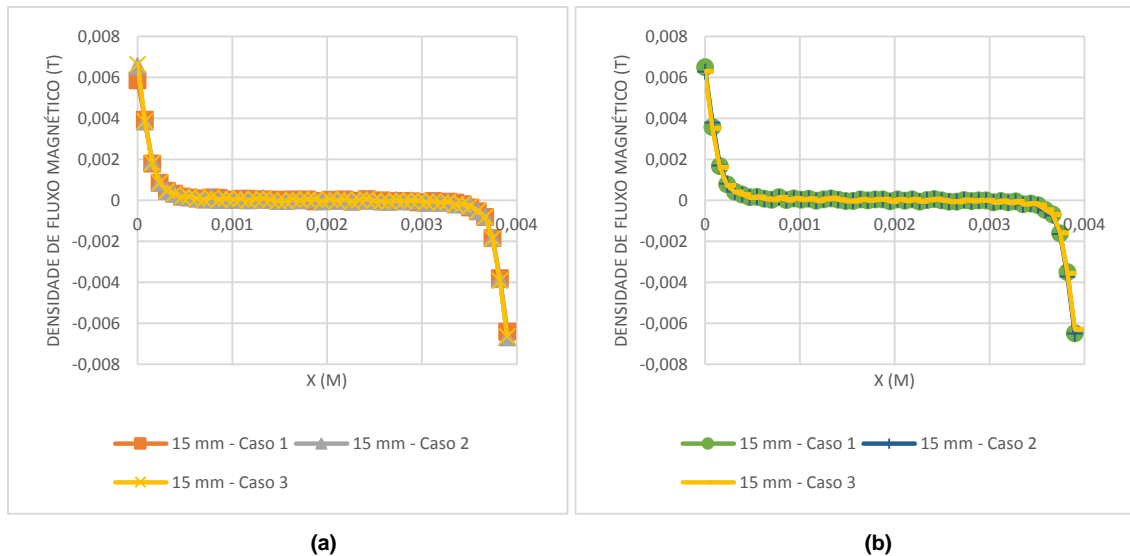


Figura 4.31 - Densidade de fluxo magnético com T2 para os casos 1, 2 e 3 quando os enrolamentos se encontram afastados 15 mm. (a) Núcleo com dimensões originais. (b) Núcleo com dimensões superiores.

Tal como se sucedeu para a T1, considerando a distância entre os enrolamentos, confirma-se que esta não influencia o percurso favorável ao caminho das linhas de campo magnético e que estas evoluem paralelamente à secção da fita SAT, devido ao facto deste constituir o caminho com menor relutância.

Relativamente à geometria do enrolamento primário, este não constitui qualquer alteração nos resultados obtidos tanto no caso das dimensões originais do enrolamento primário como para os três casos estudados.

4.3 Topologia 3

A topologia 3, denominada T3, encontra-se representada na figura 4.34 e foi desenvolvida no âmbito da dissertação de (Ferreira, 2013), a qual se irá inserir no ensaio experimental. As dimensões do LCS com a T3 encontram-se no *Apêndice 2 - Desenho do Limitador de Corrente Supercondutor com a Topologia 3* (Ferreira, 2013).

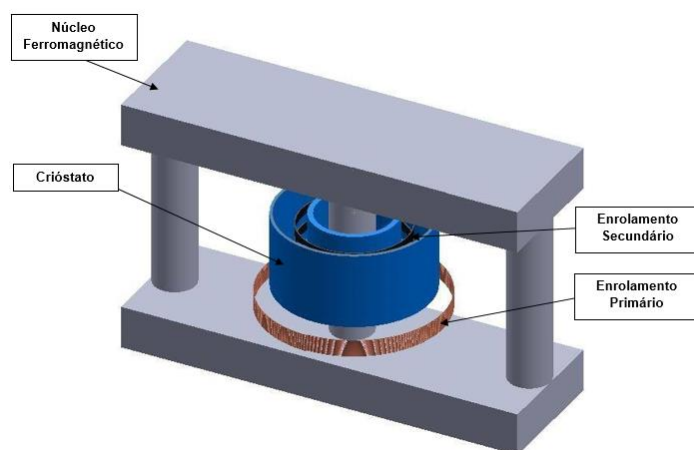


Figura 4.32 – LCS do tipo indutivo com Topologia 3.

Para a T3, realizaram-se duas fases de simulações, a primeira fase corresponde à simulação, em regime de funcionamento normal, com apenas uma fita SAT, com 90 V na tensão máxima de alimentação, a impedância de linha com 1Ω e a impedância de carga com 60Ω . Numa segunda fase, as simulações ocorrem igualmente em regime de funcionamento normal mas adicionando uma segunda fita SAT. Consequentemente repetem-se as simulações mantendo os parâmetros do circuito elétrico utilizado para a primeira fase e realiza-se mesmo método para a análise de resultados. Como se trata do LCS que será utilizado no ensaio experimental, apenas se realizaram simulações para a distância mínima real de 26 mm e para a distância máxima real de 39 mm.

Tal como se realizou para as T1 e T2, realiza-se exatamente o mesmo método de simulação no *software* Flux2D®, analisando os resultados quando o enrolamento primário contém 20 espiras e quando o núcleo apresentar as dimensões quatro vezes superiores.

De um modo teórico, com o intuito de evitar que o LCS comece a limitar corrente e de modo a que as fitas SAT se mantenham no estado supercondutor, dimensionaram-se as correntes máximas na linha em concordância com o número de espiras dos enrolamentos.

Com base no dimensionamento realizado, quando o LCS possui apenas uma fita SAT, a corrente máxima teórica na linha é de 5,78 A, e quando da simulação no *software* Flux2D®, a corrente máxima na linha atinge cerca de 1,77 A. Deste modo, garante-se que se a corrente na linha apresentar um valor abaixo do valor teórico, o material encontra-se no estado supercondutor, caso contrário esta encontra-se no estado normal e consequentemente o LCS começa a limitar.

Quando se adiciona uma segunda fita SAT garante-se a mesma situação, porém, neste caso, o valor da corrente na linha teórico é de 11,55 A e os resultados obtidos por *software* apresentam 1,77 A na corrente máxima da linha, o que garante igualmente as suas propriedades supercondutoras.

De seguida serão apresentadas as simulações realizadas por *software* para a T3, atendendo aos resultados da corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário bem como a densidade de fluxo magnético.

4.3.1 Corrente no Enrolamento Secundário

De modo a evidenciar a corrente máxima que atravessa o enrolamento secundário, a figura 4.33 mostra os resultados referentes ao valor da corrente no enrolamento secundário, quando o LCS possui uma fita SAT e quando este possui duas fitas, bem como as simulações realizadas quando este apresenta as dimensões originais do núcleo ou quatro vezes superiores.

Com base na figura 4.33, quando o núcleo do LCS apresenta as dimensões originais e uma fita SAT, independentemente da distância a que este se encontra do enrolamento primário, a corrente máxima no SAT é de, aproximadamente, 34,8 A. Quando este possui duas fitas SAT, a corrente máxima aumenta para 39,5 A, havendo assim uma discrepância de 4,7 A.

Quando se adiciona uma segunda fita SAT, a corrente máxima que atravessa as fitas é superior, aumentando cerca de 1,79 A, relativamente à utilização de apenas uma fita. É possível referir que quanto maior for o número de fitas SAT na constituição do LCS, maior será a corrente no enrolamento secundário onde a distância entre o enrolamento primário e o secundário não apresenta discrepâncias na corrente do enrolamento secundário.

Por outro lado, realizaram-se novas simulações para o mesmo caso, em que apenas se aumentaram as dimensões do núcleo ferromagnético do LCS, de modo a verificar a sua influência na corrente no enrolamento secundário. Os resultados demonstraram-se bastante aproximados aos resultados obtidos para a figura 4.33 e desta forma não se verificou oportuno representá-los.

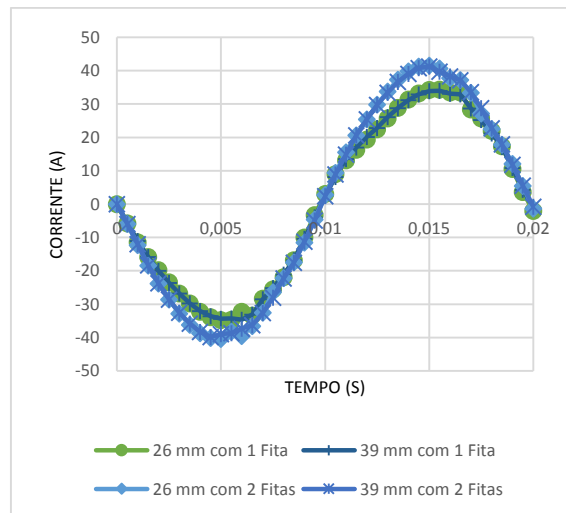


Figura 4.33 – Corrente no enrolamento secundário com T3 em que o SAT possui uma fita e duas fitas.

Quando se adiciona uma segunda fita SAT, a corrente máxima que atravessa as fitas é superior, aumentando cerca de 1,8 A, relativamente à utilização de apenas uma fita. É possível referir que quanto maior for o número de fitas SAT na constituição do LCS, maior será a corrente no enrolamento secundário onde a distância entre o enrolamento primário e o secundário não apresenta discrepâncias na corrente do enrolamento secundário.

4.3.2 Queda de Tensão aos Terminais do LCS

As figuras 4.34(a) e 4.34(b) apresentam os resultados obtidos para a queda de tensão aos terminais do LCS, sem e com alterações às dimensões do núcleo ferromagnético, respetivamente.

Com base na figura 4.33(a) é possível observar que para a distância mínima de 26 mm entre o enrolamento primário e a fita SAT, a queda de tensão é menor quando o LCS possui duas fitas SAT, apresentando uma queda de tensão máxima de -29 mV. Ao invés, quando o LCS possui apenas uma fita, a queda de tensão aumenta para -32 mV, existindo uma discrepância de 3 mV entre ambos.

Quando ambos se encontram a uma distância máxima de 39 mm, a queda de tensão máxima aos terminais do LCS é de, aproximadamente, -48 mV quando este apresenta duas fitas SAT, em contrapartida, a queda de tensão máxima é cerca de -52 mV quando o LCS possui apenas uma fita, havendo uma diferença de 4 mV.

Com base nos resultados obtidos é possível verificar que quanto mais próximos os enrolamentos se encontrarem, menor será a queda de tensão aos terminais do LCS, onde a utilização de duas fitas SAT permite uma maior blindagem magnética ao núcleo ferromagnético e consequentemente, ocorrerá uma menor queda de tensão.

Com o aumento nas dimensões do núcleo ferromagnético, com base na figura 4.34(b) é possível observar que quando a distância entre os enrolamentos é mínima, a queda de tensão também é menor. Quando o LCS possui duas fitas SAT e quando se encontram a 26 mm do enrolamento primário, o valor máximo da queda de tensão é de -27,1 mV, e quando possui uma fita SAT, apresenta cerca de -29,9 mV na queda de tensão máxima aos terminais do LCS, existindo uma discrepância de 3,88 mV.

Quando o enrolamento primário se encontra à distância máxima de 39 mm do enrolamento secundário e quando possui duas fitas SAT, a queda de tensão é de -43,5 mV e cerca de -48,6 mV quando o LCS possui apenas uma fita SAT. A discrepância entre ambos é de 5,1 mV, favorecendo a utilização de duas fitas SAT, tal como se sucedeu para o caso anterior.

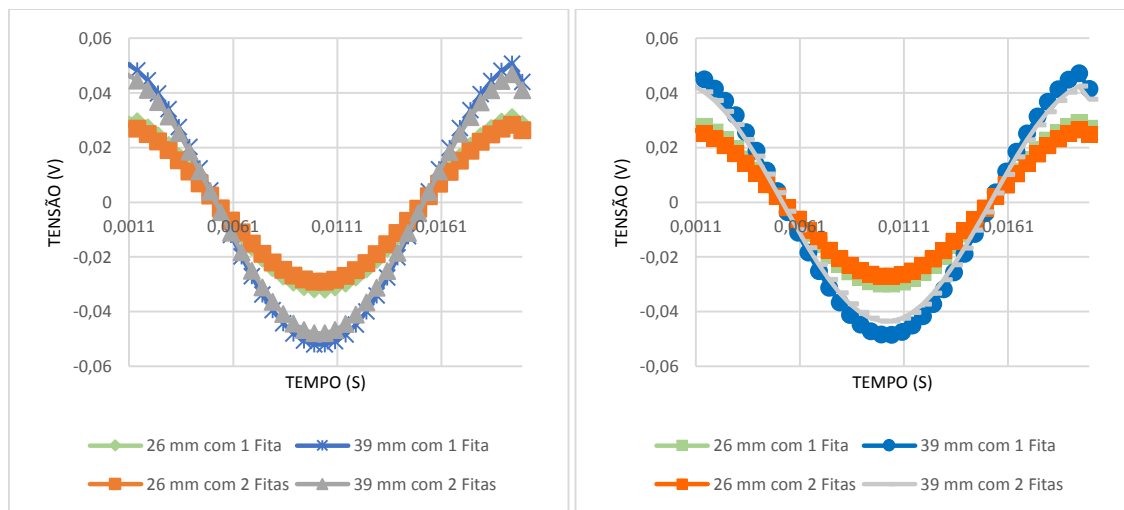


Figura 4.34 – Queda de tensão aos terminais do LCS com T3 em que o SAT possui 1 fita e 2 fitas. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores.

Tal como ocorreu para o caso anterior, verifica-se que quanto mais próximos os enrolamentos se encontrarem e quanto maior o número de fitas SAT, a blindagem magnética ao núcleo ferromagnético é superior e consequentemente, ocorrerá uma menor queda de tensão aos terminais do LCS.

Comparando os resultados obtidos no Flux2D®, quando se utiliza as dimensões originais do núcleo e quando se apresentam as dimensões cerca de quatro vezes maiores, é possível observar que a discrepância entre ambos é pouco significativa, existindo uma diminuição de 2 mV em todas as situações.

Os resultados obtidos anteriormente indicam que quando o enrolamento primário se encontra distante do enrolamento secundário cerca de 26 mm, a queda de tensão é menor quando o

LCS possui duas fitas SAT, apresentando assim cerca de 0,32% da tensão na fonte de alimentação.

Quando ambos se encontram à distância máxima de 39 mm, a queda de tensão aos terminais do LCS é mínima quando este possui duas fitas SAT, apresentando, aproximadamente, 0,53% da tensão na fonte de alimentação.

4.3.3 Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário

A figura 4.37(a) mostra os resultados obtidos para o fluxo ligado com o primário e onde é possível observar que o máximo centra-se nos 82 μWb quando o LCS possui apenas uma fita SAT e encontra-se à distância de 39 mm. Quando o LCS apresenta duas fitas SAT, e o valor do fluxo ligado diminui para 75 μWb considerando a mesma distância.

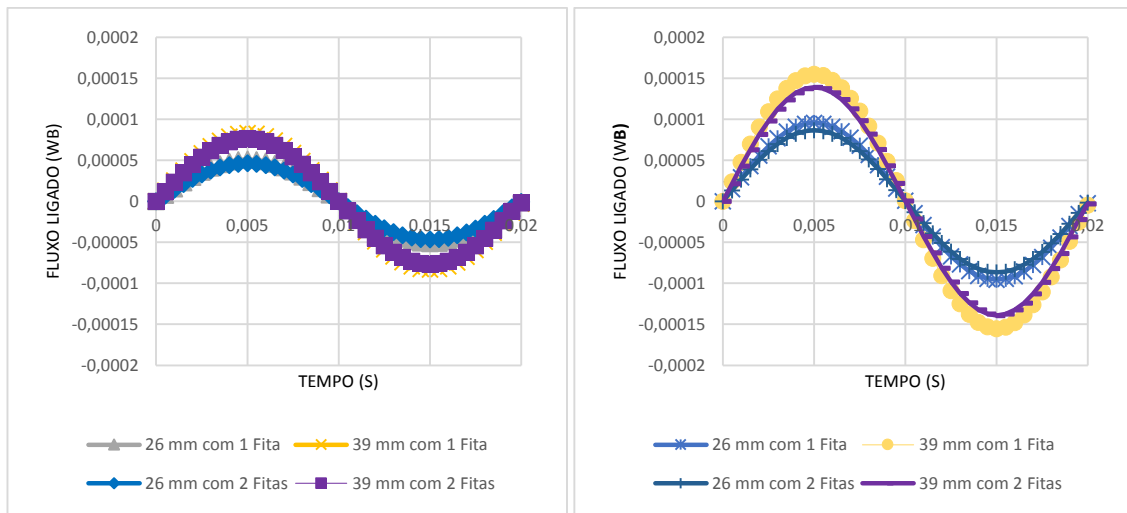
Pode-se observar que neste caso, quando o LCS possui apenas uma fita SAT e esta encontra-se à distância de 26 mm do enrolamento primário, é possível verificar que o fluxo ligado é, aproximadamente, 51 μWb . Quando existem duas fitas SAT, o valor do fluxo diminui ligeiramente para 47 μWb .

É possível compreender que tendo em conta que a presença de duas fitas SAT resulta numa maior blindagem magnética por parte do enrolamento secundário em relação ao núcleo, referindo também que quanto mais próximos se encontram os enrolamentos, menor será o fluxo ligado, levando a que haja uma menor queda de tensão, como se observou para a secção anterior.

De modo a entender a influência das dimensões do núcleo ferromagnético, a figura 4.37(b) apresenta os resultados simulados quando o núcleo ferromagnético possui dimensões quatro vezes superiores.

É possível observar algumas discrepâncias relativamente à influência nas dimensões do núcleo, na medida em que, quando ambos se encontram a uma distância máxima de 39 mm onde o LCS possui apenas uma fita SAT, o valor do fluxo ligado é de, aproximadamente, 155 μWb , cerca do dobro relativamente ao caso anterior. De seguida, é possível observar que quando ambos se encontram a uma distância de 39 mm e com duas fitas SAT, o valor do fluxo ligado diminui para 13,8 μWb .

Quando o enrolamento primário e o SAT se encontram a uma distância de 26 mm é possível verificar que o fluxo ligado atinge o valor de 87 μWb quando o SAT possui uma fita e quando este possui duas fitas SAT, o valor do fluxo é 85,8 μWb .



(a) (b)
Figura 4.35 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com T3 em que o SAT possui 1 fita e 2 fitas. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores.

Comparativamente ao caso anterior é possível verificar que quando o núcleo apresenta as dimensões originais, o valor de fluxo ligado é menor relativamente ao caso em que as dimensões do núcleo são cerca de quatro vezes superiores. Quando o LCS possui duas fitas SAT verifica-se que existe uma maior blindagem magnética ao núcleo ferromagnético levando à diminuição do valor da tensão aos terminais do LCS.

4.3.4 Densidade de Fluxo Magnético

As figuras 4.36 e 4.37 referem-se aos valores da densidade de fluxo magnético quando se traçou componente normal junto ao material supercondutor em ambiente de simulação com o propósito de estudar as linhas de campo magnético e o valor da densidade de fluxo magnético em regime de funcionamento normal.

As figuras 4.36(a) e 4.36(b) mostram a densidade de fluxo magnético quando os enrolamentos encontram-se distantes cerca de 18,5 mm em que o núcleo ferromagnético do LCS apresenta as dimensões originais e quando este apresenta dimensões superiores, respetivamente. Baseando-se nas figuras 4.36(a) e 4.36(b), é possível observar uma pequena discrepância nos extremos dos gráficos, nomeadamente entre $x = 0$ m e $x = 0.001$ m e ainda no intervalo de $x = 0.004$ m e $x = 0.005$ m verificando que o aumento das dimensões do núcleo ferromagnético influenciam o valor da densidade de fluxo magnético. Existe uma discrepância entre os resultados obtidos nas figuras 4.36(a) e 4.36(b), na medida em que quando $x = 0$ m, as linhas de campo magnético assumem valores entre $B = 7.5$ mT quando o núcleo do LCS mantém as dimensões originais e quando se aumentam, o valor da densidade de fluxo magnético diminui para $B = 6.7$ mT, como ilustra a figura 4.36(b).

Para que o valor da densidade de fluxo magnético se encontre no intervalo de $B = 0 \text{ T}$ a $B = 4 \text{ T}$, como explicado no *Capítulo 3 – Descrição da Metodologia*, as linhas de campo magnético têm de ser paralelas à superfície da fita SAT do LCS. Verifica-se este facto como se pode observar pelas figuras 4.36 no intervalo de $x = 0.001 \text{ m}$ e $x = 0.004 \text{ m}$ em qualquer uma das situações.

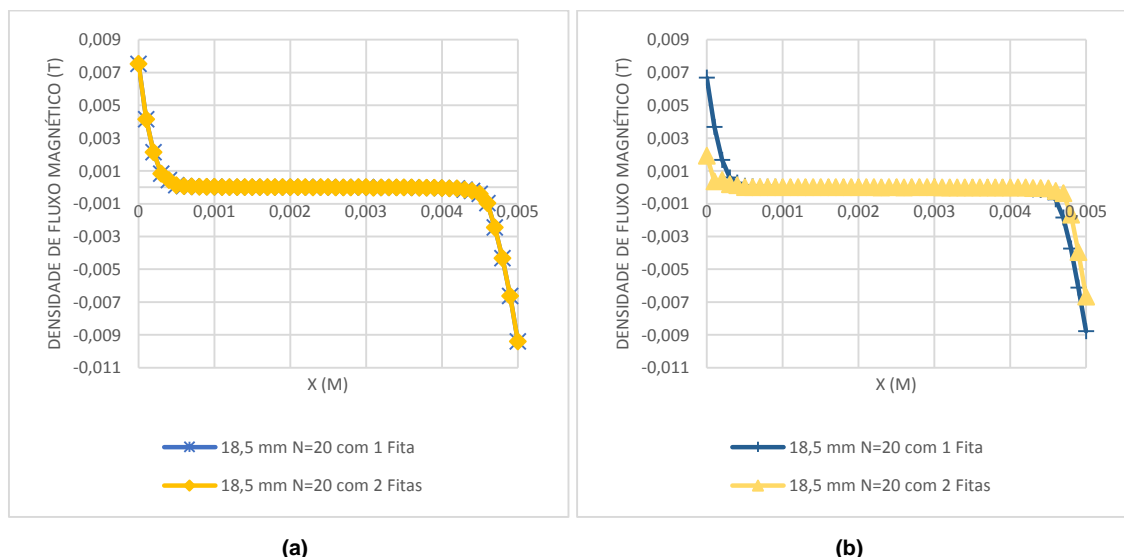


Figura 4.36 - Densidade de fluxo magnético com T3 quando os enrolamentos se encontram afastados 19 mm. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores.

As figuras 4.37(a) e 4.37(b) mostram os resultados referentes à densidade de fluxo magnético quando o enrolamento secundário encontra-se à distância máxima de 39 mm de distância do enrolamento primário para duas situações distintas. Neste sentido, a figura 4.37(a) corresponde às dimensões originais do LCS e a figura 4.37(b) corresponde às simulações referentes a um núcleo ferromagnético superior.

Existe uma discrepância entre os resultados obtidos nas figuras 4.37(a) e 4.37(b), na medida em que para $x = 0 \text{ m}$, as linhas de campo magnético assumem valores entre $B = 2.8 \text{ mT}$ e $B = 7 \text{ mT}$. Enquanto que para a figura 4.37(b) a densidade de fluxo magnético mantém-se bastante próxima ao caso anterior em que assume $B = 2.3 \text{ mT}$ até $B = 7.9 \text{ mT}$.

Neste sentido, é de notar que, o percurso favorável ao caminho das linhas de campo magnético centra-se no núcleo ferromagnético do LCS, em que estas evoluem paralelamente à secção da fita SAT, devido ao facto deste constituir o caminho com menor relutância para as linhas. Porém, caso a fita SAT se encontre no estado normal em que não apresenta propriedades supercondutoras ocorre blindagem magnética em que as linhas são muito fracas e em menor quantidade.

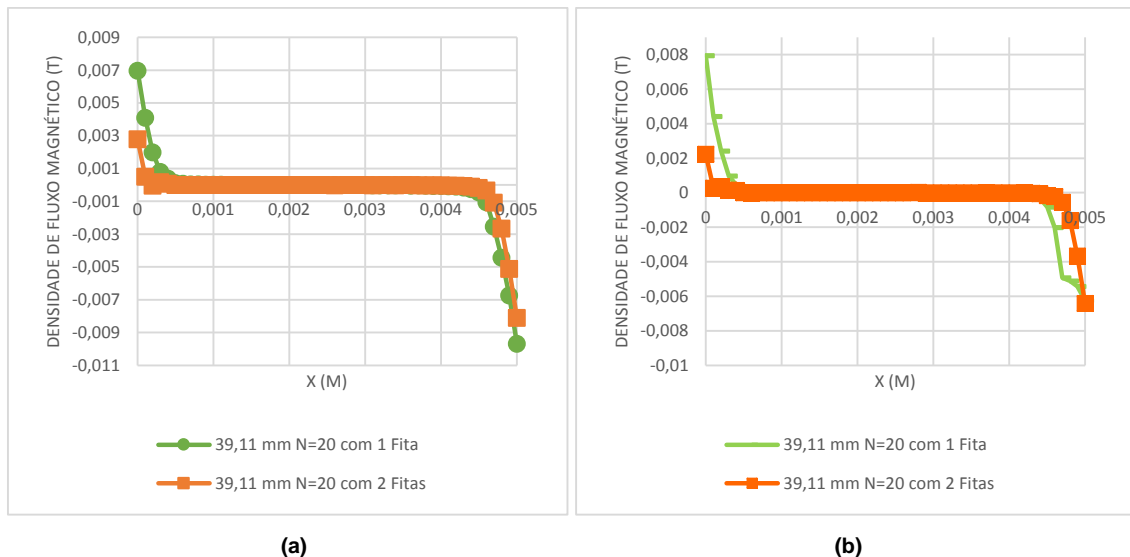


Figura 4.37 - Densidade de fluxo magnético com T3 quando os enrolamentos se encontram afastados 39 mm. (a) Núcleo com as dimensões originais. (b) Núcleo com as dimensões superiores.

Tal como se sucedeu para a duas topologias anteriores, considerando a distância entre os enrolamentos, confirma-se que esta não influencia o percurso favorável ao caminho das linhas de campo magnético e que estas evoluem paralelamente à secção da fita SAT, devido ao facto deste constituir o caminho com menor relutância.

Relativamente à geometria do enrolamento primário, este não constitui qualquer alteração nos resultados obtidos tanto no caso das dimensões originais do enrolamento primário como para os três casos estudados.

4.4 Síntese

No presente capítulo analisaram-se os resultados obtidos com base nas simulações com recurso ao *software* Flux2D® para as três topologias, observando a corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o primário bem como a densidade de fluxo magnético.

Estudou-se a influência da distância entre os enrolamentos, bem como, os efeitos no aumento das dimensões do núcleo ferromagnético do LCS. Analisou-se ainda o resultado que poderia provocar no comportamento do LCS em regime normal caso se aumentasse ou diminuísse o número de espiras no enrolamento primário e no secundário. Deste modo, analisou-se a invisibilidade do LCS perante a rede elétrica.

5 Procedimento Experimental

A presente secção corresponde ao ensaio experimental recorrendo ao protótipo de um LCS do tipo indutivo presente no laboratório⁸ do DEE com o intuito de efetuar um paralelo os resultados obtidos no *software* Flux2D[®] presentes no *Capítulo 4 - Simulação e Análise de Resultados no Software Flux2D[®]*.

No seguimento do presente capítulo, realizou-se apenas um tipo de ensaio, onde o protótipo do LCS do tipo indutivo funcionava em regime normal, onde se mediu e analisaram-se algumas variáveis de modo a estudar o comportamento do LCS. Mediu-se a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e ainda outras duas parâmetros, sendo estas a queda de tensão na fonte e a corrente na linha. A medição destas últimas duas variáveis teve como principal objetivo o controlo do valor das tensões dimensionadas teoricamente, evitando que o protótipo do LCS começasse a limitar corrente ou que as fitas SAT perdessem as suas propriedades supercondutoras.

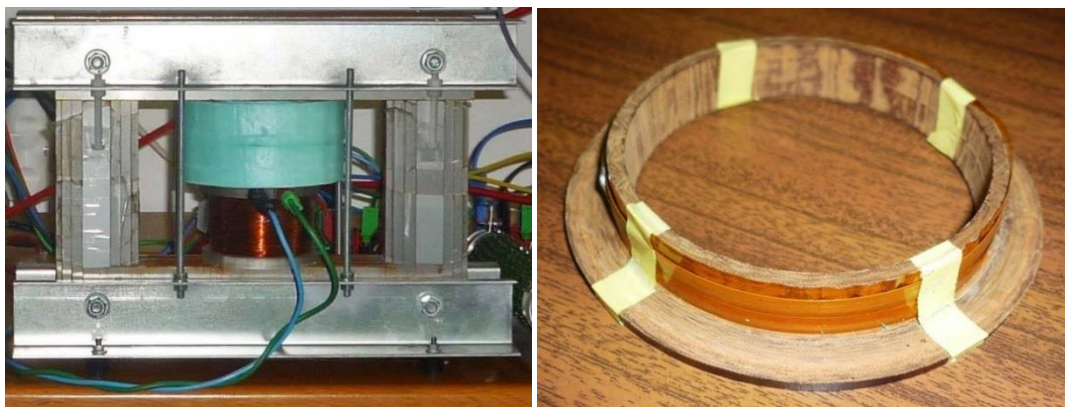
Para finalizar, no presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o ensaio experimental.

5.1 Constituição do Protótipo do LCS

O protótipo do LCS existente no laboratório, como evidencia a figura 5.1(a), é constituído por um núcleo ferromagnético composto por chapas de Fe-Si (Ferro-Silício) e apresenta três colunas, em que as dimensões do núcleo encontram-se no *Anexo 2 – Dimensões do Núcleo Ferromagnético com Topologia 3* (Ferreira, 2013). O enrolamento primário encontra-se num suporte em acrílico e serão utilizados diferentes números de espiras, nomeadamente 40, 60 e 80 espiras compostas por fio de cobre com uma secção de 0,5 mm².

O enrolamento secundário é formado por duas fitas supercondutoras Bi-2223 fabricadas pela empresa Innost em que apresentam 38 mm de raio, 4,2 mm de altura e uma espessura de 0,23 mm. Posteriormente estas serão colocadas em suportes constituídos por *Celeron*, com 15 mm de altura e 80 mm de diâmetro, tal como se pode ver na figura 5.1(b) (Ferreira, 2013).

⁸ O LCS utilizado encontra-se presente na dissertação do Ricardo Ferreira (Ferreira, 2012).



(a) (b)
Figura 4.38 - Estrutura do LCS e Fitas Supercondutoras utilizadas no ensaio experimental. (a) Protótipo do LCS do tipo indutivo. (b) Duas fitas supercondutoras Bi-2223 fabricadas pela empresa Innost.

Por sua vez, aquando da realização do ensaio experimental, as duas fitas SAT são colocadas no suporte de Celeron e posteriormente colocados no interior de um crióstato. No seu interior será colocado azoto líquido a 77 K com o intuito de evitar que as fitas SAT não atinjam ou excedam o seu valor de temperatura crítica, mantendo-as assim no estado supercondutor (Ferreira, 2013). A tabela 5.1 indica os dados técnicos referentes à fita supercondutora Bi-2223, a ter em consideração no ensaio experimental.

Tabela 4.1 – Dados técnicos da fita supercondutora Bi-2223 utilizada para o procedimento experimental referente à empresa Innost (Arsénio, 2012).

Designação	Valor
Corrente Crítica na fita supercondutora Bi-2223	90 A
Densidade Crítica de Corrente de Engenharia	93 A/mm ²
Largura	4,2 mm
Espessura	0,23 mm

5.2 Montagem Experimental

Com vista a adquirir os sinais provenientes das medições realizadas ao protótipo existente, e com o intuito de estudar os parâmetros descritas anteriormente, foi necessário utilizar uma placa de aquisição de sinais (NI USB-6008) com ligação ao computador através de um cabo USB a partir do *software LabView SignalExpress* (Ferreira, 2013).

Como a placa de aquisição de dados apenas lê valores de tensão num intervalo de -10 V a 10 V e como se irão realizar ensaios para valores de tensões superiores, dimensionou-se um amplificador operacional RC4136N em montagem subtratora de modo a que este diminua a amplitude do sinal proveniente do protótipo do LCS (Arsénio, 2012). Caso não se realizasse este dimensionamento, a leitura dos dados provenientes do ensaio experimental poderia

danificar a placa de aquisição de dados. De forma geral, o ganho da montagem subtratora é dada pela equação (5.1):

$$V_o = G(V_1 - V_2) \quad (5.1)$$

Com base na expressão (5.1) e admitindo que $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, bem como $R_2 = R_4 = 22 \text{ k}\Omega$, então o ganho da montagem subtratora é dado pela relação $\frac{R_2}{R_1}$ e traduz-se pela expressão (5.2).

$$G = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow G = \frac{1 \text{ k}\Omega}{22 \text{ k}\Omega} \quad (5.2)$$

A figura 5.2 ilustra a montagem subtratora dimensionada anteriormente onde evidencia a toda a montagem elétrica do circuito de aquisição de dados, sendo esta composta por quatro montagens subtratoras, em prol dos quatro canais utilizados onde se insere a placa de aquisição de sinal, tal como ilustra a figura 5.3.

Como tal, de modo a realizar o acondicionamento e aquisição dos sinais provenientes do protótipo do LCS, utilizaram-se os quatro canais, sendo estes o canal 1 (CH1) composto por um circuito integrador com ganho unitário de modo a realizar a leitura do fluxo ligado com o primário, o canal 2 (CH2) realiza a leitura da corrente na linha de modo a verificar se as fitas SAT se mantêm no estado supercondutor, o canal 3 (CH3) efetua a leitura da tensão aos terminais do LCS e por fim, o canal 4 (CH4) realiza a leitura da tensão na fonte de modo a haver um controlo durante os ensaios experimentais com o intuito deste não ultrapassar o valor previamente dimensionado.

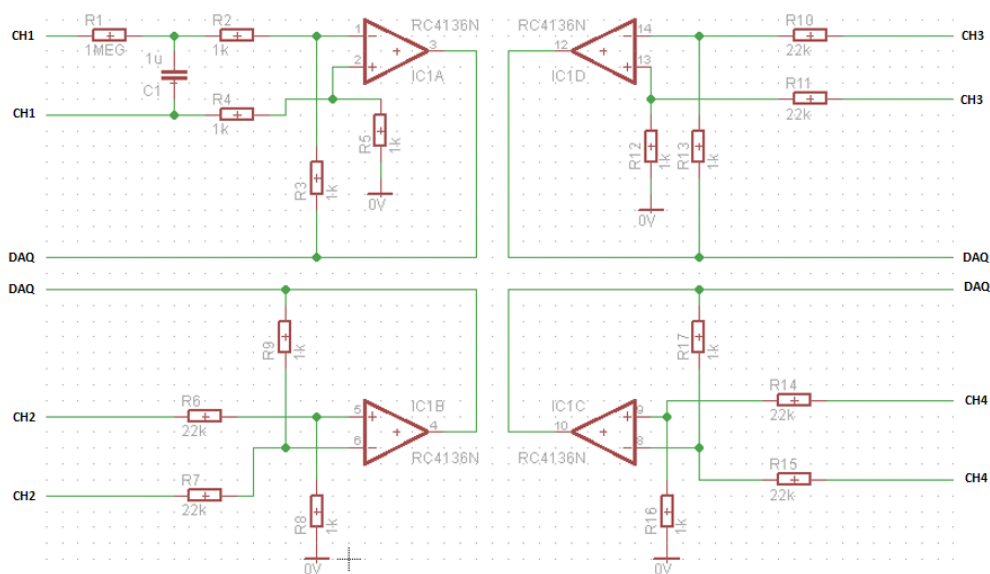


Figura 4.39 – Circuito subtrator com o circuito integrador no CH1.

Com base na figura 5.3 é possível observar os quatro canais presentes na placa aquando da realização do ensaio experimental, tal como referido anteriormente.

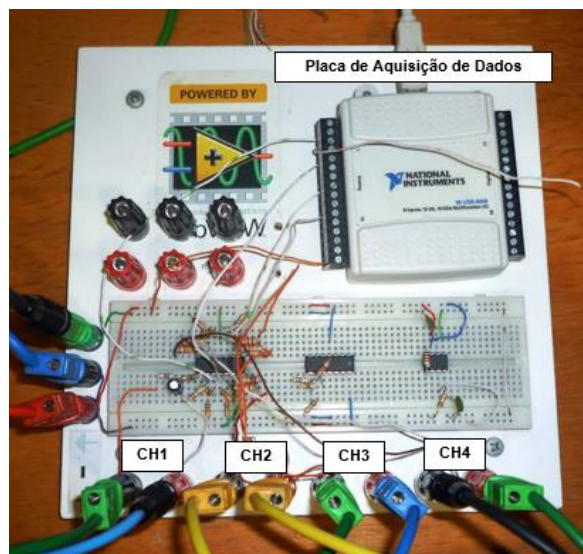


Figura 4.40 – Circuito elétrico referente à aquisição dos dados provenientes do protótipo do LCS utilizado no ensaio experimental.

De um modo esquemático, a figura 5.4 ilustra as medições realizadas aquando do ensaio experimental do protótipo do LCS em regime de funcionamento normal. Com base nas informações presentes na figura 5.4 é possível observar que se efetuou a medição da tensão na fonte de alimentação, sendo esta representada por U_{FONTE} , mediu-se ainda a tensão aos terminais da resistência de linha, I_{LINHA} , a queda de tensão aos terminais do LCS, representado por, U_{LCS} , e por fim o fluxo ligado com o enrolamento primário representado por ψ_{LCS} .

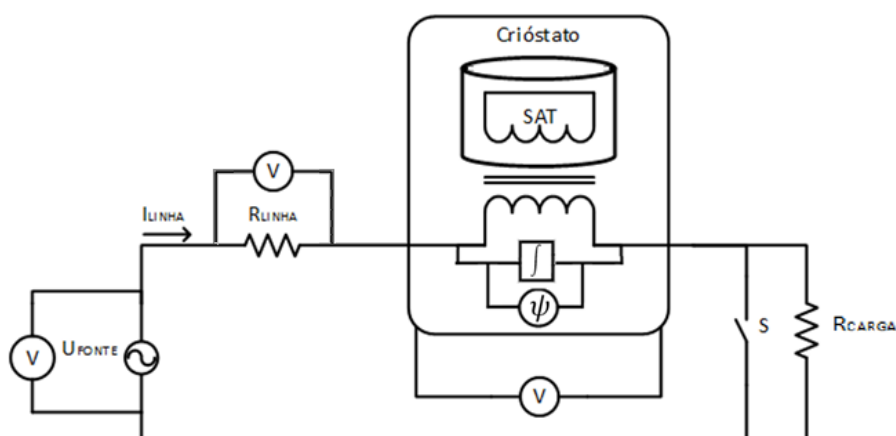


Figura 4.41 – Montagem e parâmetros medidas durante o ensaio experimental.

De uma forma geral, a figura 5.5 apresenta a montagem completa utilizada para a realização do ensaio experimental do protótipo do LCS em regime de funcionamento normal, onde se pode observar todos os dispositivos necessário à sua realização.

Neste sentido e com base nas informações da figura 5.5, é possível observar que utilizou-se um PC com ligação á placa de aquisição de dados de modo a proceder-se ao processamento e tratamento de dados. Utilizou-se o protótipo do LCS com duas fitas SAT colocadas n interior de um criostato e um enrolamento primário onde se variou o seu número de espiras em 20, 60 e 80. Como se pode observar, procedeu-se à utilização de uma resistência de carga, uma resistência de linha e um auto-transformador.

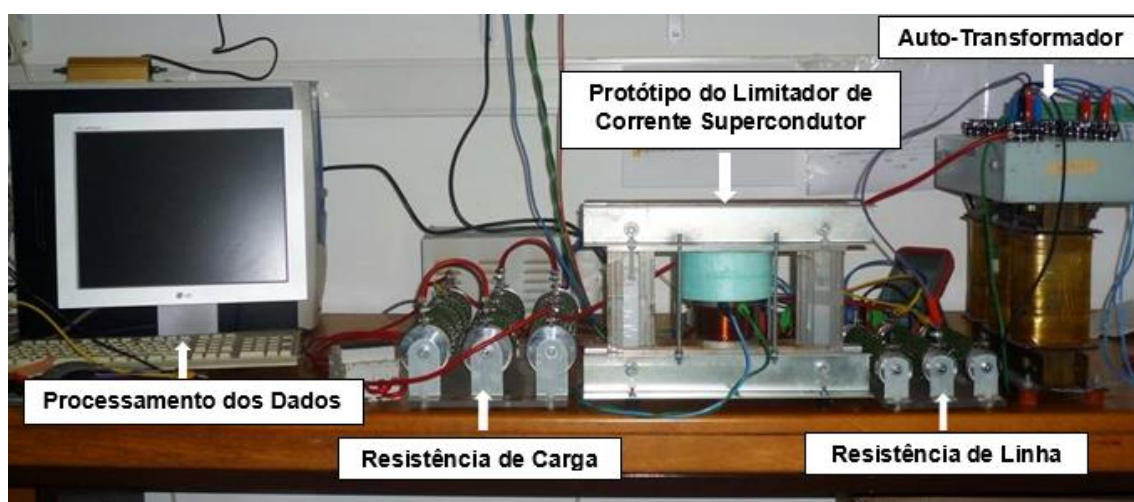


Figura 4.42 – Montagem experimental utilizada para o protótipo.

Seguidamente apresentam-se serão discutidos com mais pormenor todos os constituintes do circuito de toda a montagem experimental, bem como o dimensionamento realizado previamente.

5.3 Ensaio Experimental do Limitador com T3

A figura 5.6 ilustra a montagem experimental utilizada, com vista a realizar o ensaio em regime de funcionamento normal com o protótipo do LCS contemplando a T3 com o intuito de estudar algumas parâmetros.

Para a realização do ensaio experimental e como se pode observar pela figura 5.5, foi utilizado um auto-transformador de potência de 0-400 V e 20 A com o intuito de variar a tensão de alimentação de todo o circuito experimental e neste sentido serviu para aumentar o valor da corrente máxima que o enrolamento secundário suporta.

Utilizou-se um transformador de isolamento com 380,220 V e 2 kVA com o objetivo de isolar a montagem do ensaio experimental perante a rede elétrica.

Foi utilizada uma resistência de carga, R_{Carga} , com um valor de $21\ \Omega$ que constitui a impedância de carga do circuito e a ainda uma resistência de linha, R_{Linha} , com $1\ \Omega$ que representa a impedância da linha.

Utilizou-se um protótipo de um LCS do tipo indutivo existente no laboratório do DEE e desenvolvido por (Ferreira, 2013) onde se variou o número de espiras do enrolamento primário para 20, 60 e 80 espiras. As duas fitas SAT compostas por Bi-2223 foram colocadas num suporte em *Celeron*, utilizando uma fita de Kapton de modo a isolá-las entre si. Posteriormente, estas serão colocadas no interior de um crióstato onde será colocado o azoto líquido a 77 K com o intuito de preservar as propriedades supercondutoras das fitas.

Na secção anterior, refere-se a utilização de uma placa de aquisição de dados que terá o papel de enviar para o PC através de USB, os resultados referentes ao ensaio experimental. Posteriormente procede-se ao tratamento e análise de resultados.

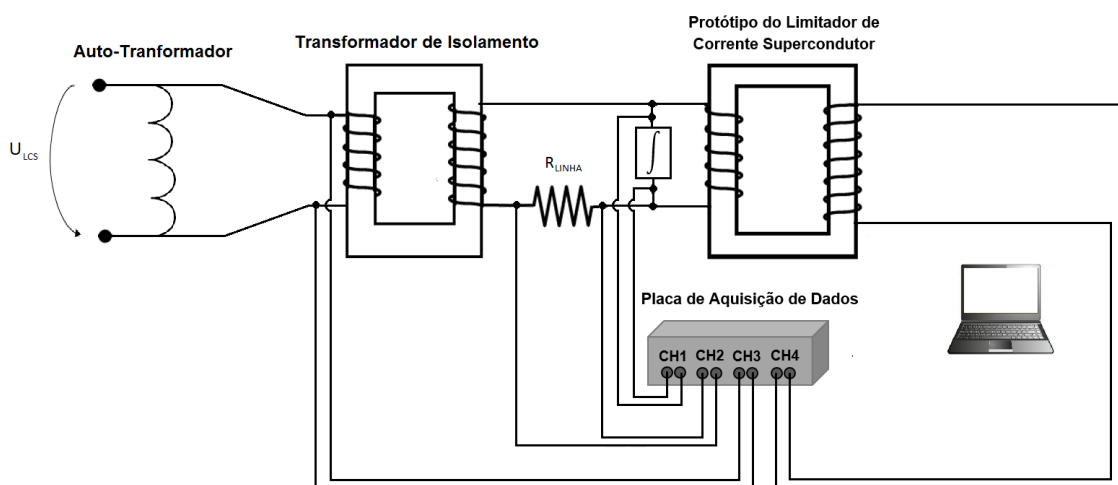


Figura 4.43 - Montagem do ensaio experimental realizado ao protótipo existente no laboratório.

De modo a garantir que as fitas SAT se mantivessem no estado supercondutor e o LCS não começasse a limitar corrente, dimensionou-se o valor da tensão de alimentação, bem como o valor da corrente na linha.

Segundo (Amaro, et al., 2014), quando a fita SAT é submetida a vários ensaios experimentais, o valor máximo da corrente crítica começa a degradar-se. Consoante os dados contidos na tabela 3, o valor da corrente crítica de uma fita SAT é de 90 A, porém como esta já sofreu repetidos ensaios, define-se uma corrente de 77 A como a sua corrente crítica real. No ensaio experimental utilizaram-se duas fitas SAT ao invés de apenas uma fita, na medida em que,

aquando do dimensionamento da tensão de alimentação e da corrente na linha, uma fita apresentava valores bastante baixos. Nesse sentido, decidiu-se utilizar duas fitas SAT, permitindo obter valores superiores de tensão máxima na fonte.

Tal como foi explicado no *Capítulo 3 – Descrição de Metodologias* com base na expressão (3.1), têm-se os seguintes dimensionamentos:

$$\begin{aligned} N_1 \times I_{\text{Linha}} &= N_2 \times I_{\text{SAT}} \quad \Rightarrow \quad 20 \times I_{\text{Linha}} = 2 \times 77 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{\text{Linha}} = 7.7 \text{ A} \\ N_1 \times I_{\text{Linha}} &= N_2 \times I_{\text{SAT}} \quad \Rightarrow \quad 60 \times I_{\text{Linha}} = 2 \times 77 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{\text{Linha}} = 2.57 \text{ A} \\ N_1 \times I_{\text{Linha}} &= N_2 \times I_{\text{SAT}} \quad \Rightarrow \quad 80 \times I_{\text{Linha}} = 2 \times 77 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{\text{Linha}} = 1.93 \text{ A} \end{aligned}$$

Os três ensaios experimentais foram efetuados com diferentes valores de tensão de alimentação bem como o número de espiras do enrolamento primário. Para um enrolamento primário com 20 espiras, a tensão de alimentação dimensionada foi de $U_1 = \frac{90}{\sqrt{2}} \text{ V}$, para 60 espiras a tensão de alimentação foi de $U_2 = \frac{50}{\sqrt{2}} \text{ V}$. Por fim, quando o enrolamento primário possui 80 espiras a tensão máxima de alimentação foi de $U_3 = \frac{40}{\sqrt{2}} \text{ V}$ enquanto que a resistência de carga manteve-se com 21Ω e a resistência de linha de 1Ω para todos os ensaios experimentais efetuados.

Como foi referido na secção anterior, utilizou-se uma Placa de Aquisição de Dados com o intuito de realizar a leitura dos sinais obtidos aquando do ensaio experimental. E por fim, de modo a receber os dados dos sinais provenientes da Placa de Aquisição de Dados, utilizou-se um PC, que irá permitir a análise e o tratamento dos dados de todo o ensaio experimental.

5.4 Análise de Resultados

A presente secção refere-se à discussão dos resultados obtidos no ensaio experimental realizado com base na utilização de um protótipo de um LCS do tipo indutivo. O ensaio experimental será realizado em regime de funcionamento normal onde será analisado o fluxo ligado com o enrolamento primário e a queda de tensão aos terminais do LCS. Refere-se ainda que será analisado o comportamento do LCS com base na limitação das correntes de CC e ainda o seu comportamento invisível perante a rede.

No ensaio experimental afastaram-se as fitas SAT do enrolamento primário de modo a avaliar e estudar os parâmetros mencionadas anteriormente. Estas foram posicionadas em cinco distâncias distintas, sendo que $d_1 = 26 \text{ mm}$ corresponde à distância mínima entre ambos, $d_2 = 29 \text{ mm}$, $d_3 = 32 \text{ mm}$, $d_4 = 35 \text{ mm}$ e $d_5 = 39 \text{ mm}$ que corresponde à distância máxima entre os

enrolamentos. Como referido anteriormente, realizaram-se três ensaios distintos para as 20, 60 e 80 espiras no enrolamento primário e analisando sempre as mesmas variáveis.

Não foi possível a medição e análise de outros parâmetros, nomeadamente a corrente máxima no enrolamento secundário nem a densidade de fluxo magnético devido aos recursos existentes no laboratório ou impossibilidade da leitura desses parâmetros. Seguidamente apresentam-se os resultados experimentais provenientes do protótipo baseando-se na leitura queda de tensão aos terminais do LCS e o fluxo ligado com o enrolamento primário.

5.4.1 Queda de Tensão aos Terminais do LCS

A figura 5.7 mostra os resultados obtidos durante o ensaio experimental para a queda de tensão aos terminais do LCS. Utilizou-se um enrolamento primário com 20, 60 e 80 espiras à medida que se afastavam as fitas SAT consoante as distâncias definidas anteriormente e mediu-se a queda de tensão aos terminais do LCS.

É possível notar que existem algumas discrepâncias nos valores de queda de tensão aos terminais do LCS quando se trata de um enrolamento primário de 20 espiras e considerando a distância entre ambos.

Como se pode observar pela figura 5.7(a), quando o enrolamento primário possui 20 espiras, o valor da queda de tensão aos terminais do LCS para distância mínima de 26 mm é de, aproximadamente, - 0,75 V. Quando os enrolamentos se encontram afastados cerca de 29 mm, a queda de tensão é próxima de - 0,84 V e quando ambos se encontram a 32 mm de distância, a queda de tensão é de - 0,87 V. Para a distância de 35 mm, a queda de tensão é de, aproximadamente, - 0,89 V e para a distância máxima de 39 mm, a queda de tensão é de, - 0,89 V.

Com base nos resultados expressos na figura 5.7(b), quando o enrolamento primário possui 80 espiras, o valor da queda de tensão aos terminais do LCS para distância mínima de 26 mm é de, aproximadamente, - 1,3 V. Quando os enrolamentos se encontram afastados cerca de 29 mm, a queda de tensão é próxima de - 1,31 V e quando ambos se encontram a 32 mm de distância, a queda de tensão é de - 1,33 V. Para a distância de 35 mm, a queda de tensão é de, aproximadamente, - 1,33 V e para a distância máxima de 39 mm, a queda de tensão é de, - 1,4 V.

É possível constatar que quanto menor a distância entre o enrolamento primário e as fitas SAT, menor será a queda de tensão entre ambos. Relativamente ao número de espiras no enrolamento primário, é possível observar que quanto maior o seu número, maior será a queda de tensão aos terminais do LCS.

Neste sentido, com o intuito do LCS tornar-se invisível perante a rede elétrica, ou seja, quando a queda de tensão aos terminais do LCS é zero, a situação mais favorável centra-se no menor número de espiras no enrolamento primário e na menor distancia entre os enrolamentos. Embora os resultados em ambiente de simulação, tal como se realizou e analisou nos capítulos anteriores, constituam um fator por vezes discrepantes em relação a resultados a nível experimental, neste caso, as conclusões foram identificadas embora com valores diferentes.

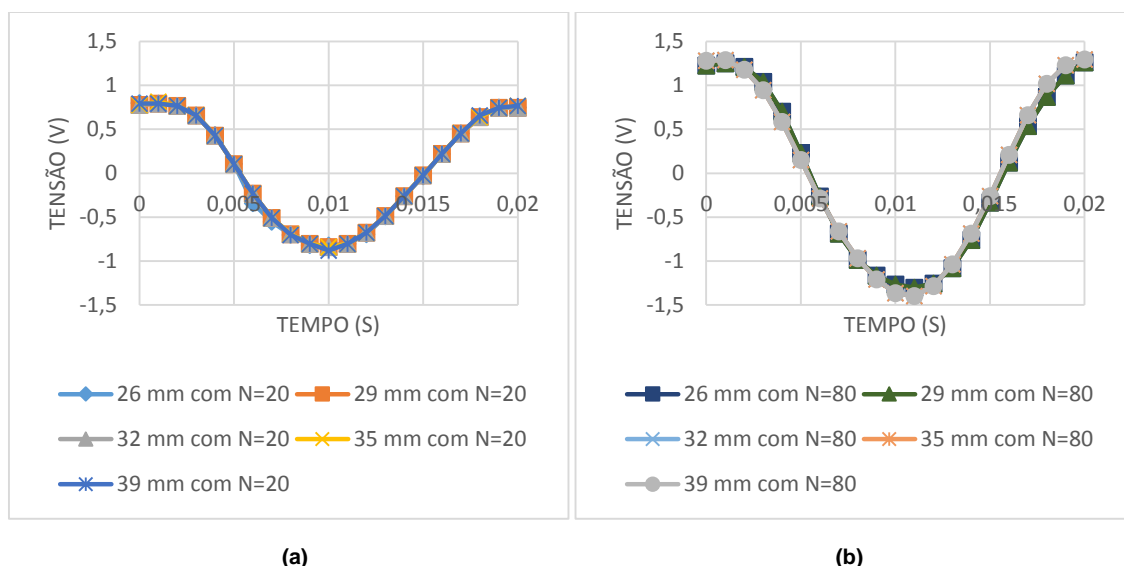


Figura 4.44 – Queda de tensão aos terminais do LCS com base nos resultados experimentais. (a) Enrolamento primário com 20 espiras. (b) Enrolamento primário com 80 espiras.

Os valores obtidos para a queda de tensão aos terminais do LCS, em regime de funcionamento normal, poderá dever-se a perdas resistivas no enrolamento primário (bobina de cobre) e no enrolamento secundário, e ainda relacionadas com os contactos elétricos de outros dispositivos que constituem o circuito referente ao ensaio experimental.

Neste sentido, aquando da realização dos ensaios experimentais do protótipo do LCS com a T3, verifica-se que os valores obtidos experimentalmente vão ao encontro dos valores dimensionados anteriormente. Confirma-se que o ensaio experimental realizou-se consoante o dimensionamento efetuado, em que as fitas SAT mantiveram-se no estado supercondutor e que o LCS se comportou corretamente em regime de funcionamento normal.

5.4.2 Fluxo Ligado com o Enrolamento Primário

De modo a estudar o fluxo ligado com o enrolamento primário, realizaram-se ensaios para 20, 60 e 80 espiras no primário, tal como mostra a figura 5.8 apresentando ainda as distâncias que separam as fitas SAT do enrolamento primário, tal como realizado para o caso anterior.

Com base na figura 5.7, quando o enrolamento primário possui 20 espiras, o valor máximo do fluxo ligado com o primário é de, aproximadamente, 120,14 μWb quando a distância é de 35 mm. Para a distância máxima entre as fitas SAT e o enrolamento primário, o fluxo máximo ligado com o primário é de, aproximadamente, 120,13 μWb , ficando bastante próximo do valor anterior. Para a distância de 32 mm, o fluxo é de 120,13 μWb , para a distância mínima entre ambos é de 121,4 μWb e para a distância de 114,45 μWb .

Para 80 espiras no enrolamento primário é possível observar que quando as fitas SAT se encontram a uma distância mínima de 26 mm do enrolamento primário, apresentam cerca de 253 μWb para o fluxo ligado com o enrolamento primário. Seguidamente, à distância de 29 mm, o valor do fluxo ligado é de 362 μWb , para 32 mm, o fluxo máximo é de, aproximadamente, 361 μWb . Por fim, para a distância de 35 mm, o valor máximo do fluxo ligado com o primário é de 353 μWb e para distância máxima entre as fitas SAT e o enrolamento primário, o valor do fluxo não se altera muito, assumindo o valor de 351 μWb .

Pode-se observar que o valor máximo do fluxo ligado com o enrolamento primário para as cinco distâncias definidas entre os enrolamentos, não se verifica muito relevante visto que os valores obtidos no ensaio experimental são bastante próximos uns dos outros.

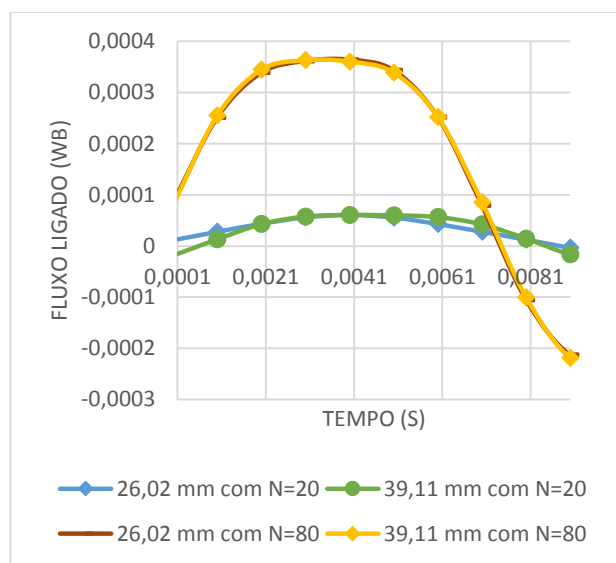


Figura 4.45 – Fluxo ligado com o enrolamento primário com base nos resultados experimentais em que o enrolamento primário possui 20 e 80 espiras.

É possível observar que quanto maior o número de espiras que compõem o enrolamento primário, menor será o fluxo ligado com o primário. Por outro lado, a distância entre as fitas SAT e o enrolamento primário não se verifica muito relevante nesta análise, na medida em que, as discrepâncias entre as distâncias são bastante baixas, na ordem dos μWb .

Observando os resultados obtidos para as duas situações, aquando do funcionamento do LCS em regime normal, a queda de tensão aos terminais do LCS encontra-se próxima de zero, na medida em que, como LCS não se encontra a limitar e não existe variação de fluxo. Neste sentido, o LCS não se encontra totalmente invisível perante a rede elétrica, visto que, existe fluxo ligado com o primário, na ordem dos μWb , tal como se verificou.

5.5 Síntese

No presente capítulo dimensionou-se e realizou-se o ensaio experimental com base na utilização de um protótipo do LCS do tipo indutivo existente em laboratório com o intuito de estudar o seu comportamento em regime de funcionamento normal.

Registou-se e analisou-se os resultados obtidos para o fluxo ligado com o enrolamento primário e a queda de tensão aos seus terminais, com vista a constatar a invisibilidade do LCS perante a rede elétrica.

6 Conclusões

Ao longo da presente dissertação com base no estudo das ligações magnética existentes entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário, realizaram-se simulações a três topologias diferentes de LCS do tipo indutivo, em regime de funcionamento normal, no *software* de elementos finitos, Flux2D®. A fim de se observar o comportamento do LCS analisou-se a corrente no enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o primário e a densidade de fluxo magnético, modificando sempre o número de espiras dos enrolamentos, verificando a capacidade de blindagem do material supercondutor.

Numa fase posterior, realizou-se o ensaio experimental com a utilização de um LCS do tipo indutivo existente em laboratório de modo a observar a capacidade de blindagem por parte das duas fitas SAT, variando o número de espiras do enrolamento primário, bem como o estudo da limitação por parte do dispositivo. Neste sentido, analisou-se os resultados obtidos para a queda de tensão aos terminais do LCS bem como o fluxo ligado com o enrolamento primário.

6.1 Considerações Finais

As análises aos resultados obtidos em ambiente de simulação com base no *software*, de elementos finitos, Flux2D® foram validados e confirmadas com base na realização de um ensaio experimental utilizando um protótipo existente em laboratório de um LCS do tipo indutivo (Ferreira, 2013).

Com base nas simulações efetuadas no *software* Flux2D®, foram estudadas três topologias diferentes, no âmbito das dissertações de (Pina, 2010) (Ferreira, 2013). O intuito das simulações centrou-se no estudo de algumas parâmetros, nomeadamente a corrente que atravessa o enrolamento secundário, a queda de tensão aos terminais do LCS, o fluxo ligado com o enrolamento primário e a densidade de fluxo magnético, variando sempre o número de espiras no enrolamento primário. É importante referir que as simulações efetuadas no *software* de elementos finitos Flux2D® de modo a validar o comportamento do LCS, apresentam algumas limitações a nível de resultados visto tratar-se de um *software* que efetua simulações em ambiente de 2D.

Com base na corrente no enrolamento secundário, o único fator que interfere centra-se no número de espiras que compõem os enrolamentos, sendo que quanto maior o seu número, maior a corrente no SAT, onde a distância entre os enrolamentos não é deveras relevante.

Permitiu estudar qual seria a distância entre os enrolamentos que permitisse ao LCS apresentar menores valores na queda de tensão aos seus terminais, assegurando que não ocorre a variação de fluxo magnético no núcleo ferromagnético. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que quanto menor o número de espiras nos enrolamentos, menor será o valor máximo do fluxo ligado bem como a queda de tensão aos terminais do LCS. Centrando-se na distância que separa os enrolamentos, o caso mais favorável será a situação em que ambos se encontram o mais próximo possível.

Ao analisar o valor da densidade de fluxo magnético no enrolamento secundário, foi possível verificar que considerando a distância entre os enrolamentos, confirma-se que o valor da densidade não influencia o percurso favorável ao caminho das linhas de campo magnético e que estas evoluem paralelamente à secção da fita SAT, devido ao facto deste constituir o caminho com menor relutância.

Neste sentido, das três topologias de LCS estudadas verifica-se que a T2, em que os enrolamentos se encontram concêntricos, constitui a topologia onde ocorrem menores valores de queda de tensão e fluxo ligado com o enrolamento primário. Deste modo, o LCS apresenta-se invisível perante a rede elétrica.

Relativamente à geometria do enrolamento primário, este não constitui qualquer alteração aos resultados obtidos tanto no caso das dimensões originais do enrolamento primário como para os três casos estudados.

O intuito da realização do ensaio experimental centrou-se na observação do comportamento do LCS do tipo indutivo existente em laboratório em regime de funcionamento normal de modo a observar a capacidade de blindagem por parte das duas fitas SAT, variando o número de espiras do enrolamento primário, bem como a limitação por parte do dispositivo. O ensaio experimental permitiu obter a queda de tensão aos terminais do LCS e o fluxo ligado com o enrolamento primário, sendo estes os parâmetros possíveis de se observar em ambiente de laboratório.

Com base nas simulações realizadas por *software*, estas apresentam discrepâncias relativamente aos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Estas diferenças podem dever-se a vários fatores, nomeadamente, a comparação entre resultados em ambiente 2D com resultados os obtidos experimentalmente. A nível de procedimentos experimentais, as perdas causadas pelo circuito implementado interferem nos valores dos resultados obtidos.

6.2 Trabalho Futuro

Após a realização da dissertação, ficam alguns temas ou pontos a abordar de modo a dar continuidade ao trabalho desenvolvido. A substituição do enrolamento secundário por fitas 2G ou utilizar outro material supercondutor seria uma mais-valia para o estudo aprofundado acerca dos parâmetros intervenientes no estudo da ligação magnética entre os enrolamentos a nível experimental. Com base no trabalho desenvolvido, caso se adicione mais fitas Bi-2223 ao protótipo constituiria uma vantagem para os resultados obtidos no ensaio experimental, visto que quanto mais espiras SAT o LCS conter, ocorrerá uma maior blindagem magnética, melhorando assim o desempenho do LCS.

A medição da corrente no enrolamento secundário para efeitos comparativos aos resultados obtidos por *software* torna-se num ponto relevante e essencial para o estudo do comportamento das fitas supercondutoras quando o LCS opera em regime normal. Este método poderá ser validado com base na conceção de uma sonda de Rogowski, a qual se tentou desenvolver e testar, mas não se obteve qualquer resultado coerente.

Baseando-se nos valores obtidos no ensaio experimental para a queda de tensão aos terminais do LCS, seria pertinente estudar os motivos e melhorar os valores experimentais, visto que ocorre um aumento considerável comparativamente aos resultados obtidos por *software*.

Uma vez que se utilizou o protótipo existente em laboratório e desenvolvido por (Ferreira, 2013), apenas se estudou o LCS em sistema monofásico, seria pertinente o seu estudo inserido num sistema trifásico.

Deste modo, torna-se bastante importante a melhoria do estudo das ligações magnéticas entre os enrolamentos, com base no número de espiras nos enrolamentos, passando pelo material que as compõem, as diferentes geometrias e constituição do núcleo ferromagnético, bem como a alteração das topologias a vários níveis. O desenvolvimento de um suporte diferente para os enrolamentos seria uma mais-valia, dando a oportunidade de afastar ou aproximar os enrolamentos do núcleo ou entre si.

A utilização do *software* de elementos finitos em ambiente 3D seria um ponto bastante importante com o intuito de aproximar cada vez mais os resultados obtidos por simulação com os resultados obtidos em ensaio experimentais com base em protótipos desenvolvidos.

7 Referências Bibliográficas

- Abrikosov, A. A. (1957). *On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group*. USSR - Union of Soviet Socialist Republics: Institute for Physical Problems, Academy of Sciences.
- Amaro, N., Šouc, J., Vojenčiak, M., Pina, J., Martins, J., Ceballos, J., & Gömöry, F. (2014). AC Losses and material degradation effects in a superconducting tape for SMES applications. *DoCEIS*, (pp. 4017-424). Monte da Caparica.
- Arsénio, P. M. (2012). *Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Almada: Monte da Caparica.
- Barth, C. (2013). *High Temperature Superconductor Cable Concepts for Fusion Magnets*. Scientific Publishing.
- Bhattacharya, R. N., & Paranthaman, M. (2010). *High Temperature Superconductors*. Golden: Wiley-VCH.
- Blair, S. M. (2013). *The Analysis and Application of Resistive Superconducting Fault Current Limiters in Present and Future Power Systems*. Glasgow: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy to Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde.
- Blair, S., Booth, C., Elders, I., Singh, N., Burt, G., & McCarthy, J. (2011). Superconducting Fault Current Limiter Application in a Power-dense marine electrical system. *IET Electrical Systems in Transportation*. United Kingdom.
- Buckel, W., & Kleiner, R. (2004). *Superconductivity: Fundamentals and Applications* (2ª ed.). Tübingen, Germany: Wiley-VCH.
- Catalão, R. J. (2013). *Desenvolvimento de um Sistema de Detecção de Quench baseado em Campo Magnético*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia : Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores.
- Chen , G., Kauffman, L., & Lomonaco, S. (2008). *Mathematics of Quantum Computation and Quantum Technology* (1ª ed.). (T. & Group, Ed.) Boca Raton, Florida, United States of America: Chapman & Hall/CRC.
- Cyrot, M., & Pavuna, D. (1995). *Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials*. Salem: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Eckroad, S. (2009). *Superconducting Fault Current Limiters*. California: Electric Power Research Institute.
- Ferreira, R. B. (2013). *Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologias, Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Almada: Monte da Caparica.
- Fossheim, K., & Sudboe, A. (2005). *Superconductivity: Physics and Applications*. West Sussex, England: Wiley.
- Fujita, S., Ito, K., & Godoy, S. (2009). *Quantum Theory of Conducting Matter: Superconductivity* (1ª ed.). New York, United States of America: Springer.

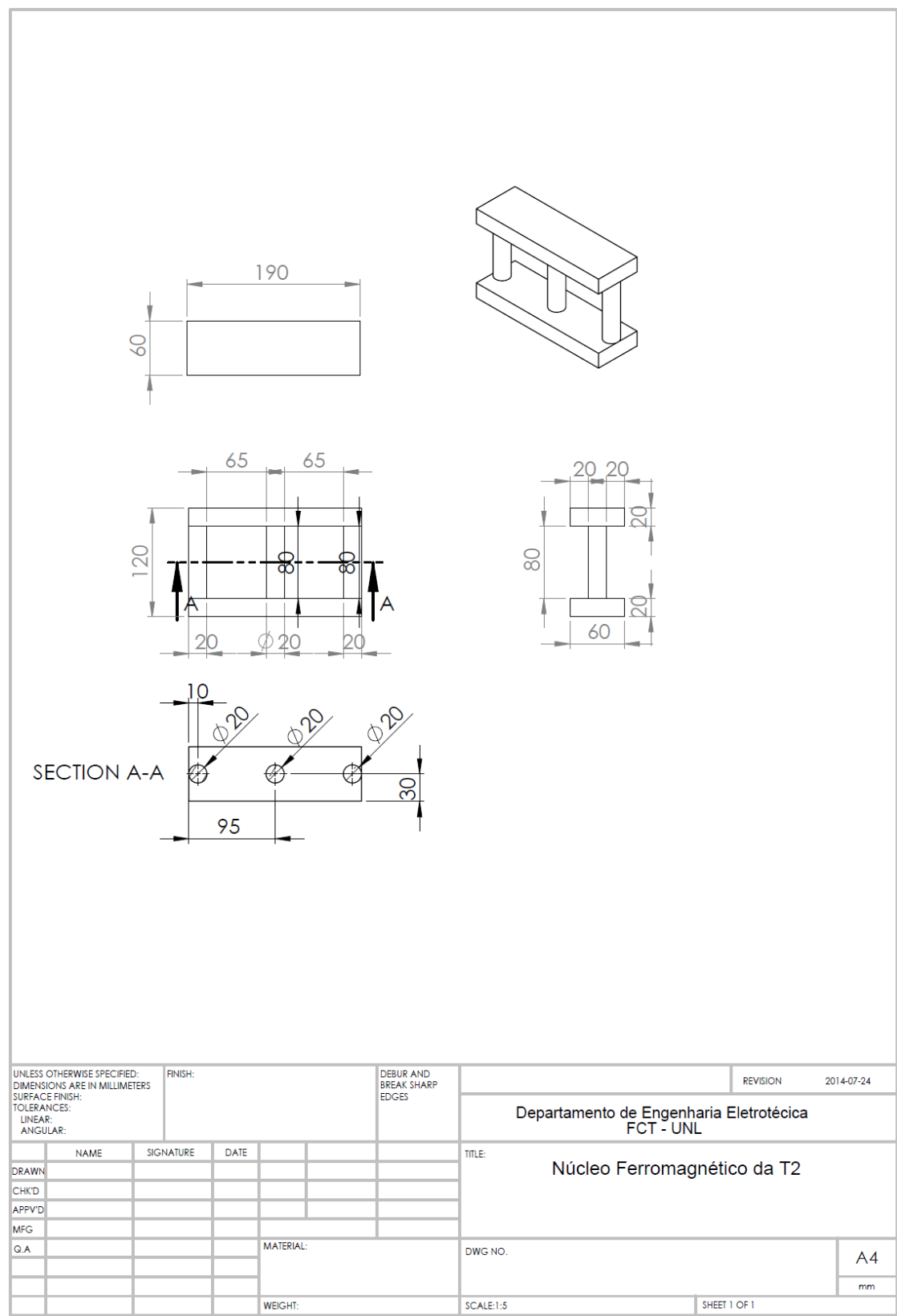
- Gessinger, G. (2009). *Materials and Innovative Product Development: Using Common Sense*. Elsevier.
- Hassenzahl, W. V., Hazelton, D., Johnson, B., Komarek, P., Noe, M., & Reis, C. (2004). *Electric Power Applications of Superconductivity*. Moscow: PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 10.
- Hazelton, D. W. (2010). *High-Performance 2G HTS Wire for an Efficient and Reliable Electricity Supply*. Waltham, MA: 2010 IEEE Conference Innovative Technology for Efficient / Reliable Electricity Supply - SuperPower Inc.
- Hein, R., Francavilla, T., & Liebenberg, D. (1991). *Magnetic Susceptibility of Superconductors and Other Spin Systems*. West Virginia: Plenum Publishing Corporation.
- Heydari, H., Abrishami, A., & Bidgoli, M. (2013). Comprehensive Analysis for Magnetic Shield Superconducting Fault Current Limiters. *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, (pp. 1051-8223). Iran.
- Ireson, G. (2012). *Discovering Superconductivity: An Investigative Approach*. United Kingdom: Wiley.
- Iwasa, Y. (1994). *Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues*. New York: Plenum Press.
- Kalsi, S. S. (2011). *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment* (1st ed.). (I. o. Engineers, Ed.) New Jersey, United States of America: John Wiley and Sons, Inc.
- Kosak, J., Janowski, T., Kozak, S., Wojtasiewicz, G., & Glowacki, B. (2006). Tests results and analysis of inductive superconducting fault. *Journal of Physics: Conference Series* 43, 946–949.
- Kovalsky, L., Yuan, X., Tekletsadik, K., & Keri, A. (2005). *Applications of superconducting fault current limiters in electric power transmission systems*. pp.2130,2133: Applied Superconductivity. IEEE Transactions on , vol.15, no.2.
- Kozak, J., Janowski, T., Kozak, S., Malinowski, H., Wojtasiewicz, G., & Kondratowicz-Kucewicz, B. (2004). *Design and Testing of 230 V Inductive Type of Superconducting Fault Current Limiter With an Open Core*. Poland: TheState Committee for Scientific Research (KBN) .
- Larbalestier, D., Gurevich, A., Matthew Feldmann , D., & Pol, A. (2001). High-Tc Superconducting Materials for Electric Power Applications. *Macmillan Magazines Ltd*, 368-377.
- López-Fernández, X. M., Bülent Ertan, H., & Turowski, J. (2013). *Transformers: Analysis, Design, and Measurement*. Boca Raton: CRC Press.
- Matsushita, T. (2007). *Flux Pinning in Superconductors*. Berlin: Springer.
- Melhem, Z. (2012). *igh Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Series in Energy.
- Morandi, A., Trevisani, L., Ribani, P., Fabbri, M., Martini, L., & Bocchi, M. (2008). Superconducting Transformers: Key Design Aspects for Power Applications. *8th European Conference on Applied Superconductivity* (pp. 1742-6596). IOP Publishing.
- Moriconi, F., De La Rosa, F., Darmann, F., Nelson, A., & Masur, L. (2010). Development and Deployment of Saturated-Core Fault Current Limiters in Distribution and Transmission Substations. *IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum*, (pp. 1288-1293).

- Noe, M. (2013). *High Temperature Superconductor Power Applications*. CERN Accelerator School, Erice, Italy.
- Onnes, H. (1912). Onnes, H. K. (1912). *Further experiments with liquid helium. H. On the electrical resistance of pure metals etc. VII. The potential difference necessary for the electric current through mercury below 4°19K*. Amsterdam. pp. 1406-1430. Amsterdam.
- Parinov, I. (2012). *Microstructure and Properties of High-Temperature Superconductors*. London: Springer.
- Paul, W., Chen, M., Lakner, M., Rhyner, J., Widenhorn, L., & Guérig, A. (1998). *1.2 MVA High-Tc Superconducting Fault Current Limiter*. Japan: Springer.
- Pina, J. M. (2010). *Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta*. Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Máquinas. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Almada: Monte da Caparica.
- Plakida, N. (2010). *High-Temperature Cuprate Superconductors: Experiment, Theory, and Applications*. Dubna, Moscow, Russia: Springer.
- Poole, J., Farach, H., Creswick, R., & Prozorov, R. (2007). *Superconductivity* (2ª ed.). San Diego, California, United States of America: Elsevier.
- Pronto, A. M. (2010). *Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura*. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Almada: Monte da Caparica: Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica, especialidade de Máquinas.
- Ribeiro, R. J. (2008). *Limitador de Corrente com Supercondutor*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- Saxena, A. K. (2010). *High-Temperature Superconductors*. Berlin: Springer Series in Materials Science.
- Seeber, B. (1998). *Handbook of Applied Superconductivity* (Vol. 2). Philadelphia, United States of America: IOP Publishing.
- Semperger, S., Városi, I., Vajda, I., Porjesz, Sokolovsky, V., Meerovich, V., & Szalay, A. (2000). HTS Fault Current Limiters: Device Modeling and Network Simulation. *Applied Electromagnetics and Computational Technology II* (p. 8). Budapest: H.Tsuboi e I.Vajda.
- Sheahan, T. P. (1994). *Introduction to High-Temperature Superconductivity* (1ª ed.). New York, United States of America: Plenum Press.
- Silva, T. A. (2013). *Construção e ensaio e modelização de um limitador de corrente supercondutor*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Almada: Monte da Caparica.
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2010). *Foundations of Materials Science and Engineering* (5ª ed.). McGrawHill.
- Sytnikov, V., Vysotsky, V., Radchenko, I., & Polyakova, N. (2008). 1G versus 2G – comparison from the practical standpoint for HTS power cables use. *8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2007)* (pp. 1742-6596). IOP Publishing.

- Tleis, N. (2008). *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*. Burlington, Vermont, United States of America: Elsevier.
- Wang, Y. (2013). *Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering* (1^a ed.). New Delhi, India: Wiley.
- Webster, J. G., & Eren, H. (2013). *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook - Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical and Biomedical Measurement* (Second Edition ed.). Boca Raton, Florida , USA: Taylor and Francis Group, LLC.
- Weinstock, H. (2000). *Applications of Superconductivity*. Netherlands: NATO ASI Series.

Apêndices

Apêndice 1 – Dimensões do Núcleo Ferromagnético com Topologia 1 e 2.



Apêndice 2 – Dimensões do Núcleo Ferromagnético com Topologia 3 (Ferreira, 2013)

